

Vysoká Škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Mobilní jeřáb

Movable crane

Student:

Bc. Jiří Mlčoch

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Josef Jurman, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jiří Mlčoch

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

70 Zemní, těžební a stavební stroje

Téma:

Přemístitelný jeřáb
Movable Crane

Zásady pro vypracování:

Navrhnete konstrukci přemístitelného jeřábu pro montáž větrných elektráren s ohledem na jednoduchou montáž. Výška jeřábu 100 m, dosah jeřábu 8 m. Zpracujte rozbor požadavků na tyto jeřáby, koncepční návrh jeřábu, silové a stabilitní výpočty, konstrukční návrh věže jeřábu a patky s respektováním měrného tlaku na zeminu. Další data budou upřesněna v průběhu řešení s vedoucím.

Seznam doporučené odborné literatury:

JEŘÁBEK, K. *Metodika navrhování strojů*. 1. vyd. Praha, Ediční středisko ČVUT Praha, 1999. 119 s.
KOPÁČEK, J. – PAVLOK, B. *Tekutinové mechanismy*. 1. vyd. Ostrava, VŠB – TU Ostrava 2005, ISBN 80-248-0586-0
ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
Firemní literatura GROVE

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Josef Jurman, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jiří Mlčoch

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ruská 34
Opava 747 06

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MLČOCH, J. *Mobilní jeřáb : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 89s. Vedoucí práce: Jurman, J.

Diplomová práce se zabývá konstrukční úpravou mobilního jeřábu za účelem zjednodušení jeho konstrukce a zkrácení času potřebného k uvedení v činnost. Jeřáb je určen hlavně pro stavbu větrných elektráren. V práci je shrnuta problematika stavby větrných elektráren a také shrnutí požadavků na jeřáby, které tyto elektrárny staví. Detailněji jsem se zabýval silovými a stabilitními výpočty jeřábu. Navrhl jsem několik možných řešení pro zjednodušení konstrukce jeřábu a zkrácení času montáže. Každé řešení jsem pevnostně a deformačně zkontroloval a zhodnotil možnost použití daného řešení. Nakonec jsem provedl výpočet měrného tlaku jeřábu na podloží a vypočítal jsem potřebné rozměry styčných desek.

ANOTATION OF MASTER'S THESIS

MLČOCH, J. *Movable crane : master's thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2012, 89p. Thesis head: Jurman, J.

The thesis engages in constructional modification of the movable crane for the purpose of simplifying its construction and reducing time needed for its assembly. The crane is primarily designed for building wind power stations. The thesis summarizes problems of building wind power stations and there is also the summary of requirements for cranes which build them. I dealt with force and stability calculations of the crane in more details. I designed a few possible solutions to simplify the crane's construction and to shorten its assembly time. Every solution is verified with respect to the strength and deformation and its use possibility is evaluated too. At last, I made a calculation of pressure which crane exerts on ground. I also calculated necessary dimensions of the contact plates.

OBSAH

LEGENDA POUŽITÝCH SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD	13
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	14
2.1 Typy větrných elektráren.....	15
2.1.1 Elektrárny s horizontální osou otáčení.....	15
2.1.2 Elektrárny s vertikální osou otáčení.....	16
2.1.3 Speciální větrné elektrárny	17
2.2 Konstrukce větrné elektrárny	18
3 JEŘÁBY PRO MONTÁŽ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	21
3.1 Požadavky na jeřáby pro stavbu větrných elektráren	21
3.2 Jeřáby s pásovým podvozkem	23
3.3 Jeřáby s kolovým podvozkem a příhradovými rameny.....	25
3.4 Jeřáby s kolovým podvozkem a teleskopickým ramenem	26
3.5 Kolový věžový jeřáb s teleskopickou věží	28
4 JEŘÁB GROVE GTK 1100	29
4.1 Parametry jeřábu.....	30
4.2 Proces montáže jeřábu	30
4.3 Navrhované časové úspory jeřábu GTK 1100.....	32
5 ZATÍŽENÍ JEŘÁBU	33
5.1 Zatížení jeřábu od břemene	34
5.2 Zatížení jeřábu od hmotnosti vysunutého výložníku.....	34
5.3 Zatížení jeřábu od větru.....	36
5.3.1 Působení větru na věž jeřábu	36
5.3.2 Působení větru na strojovnu výložníku.....	38
5.3.3 Působení větru na rameno výložníku.....	39
6 STABILITA JEŘÁBU	42
6.1 Výpočet dílčích destabilizačních momentů.....	44
6.1.1 Destabilizační moment od hmotnosti břemene.....	44
6.1.2 Destabilizační moment od hmotnosti ramena výložníku.....	44
6.1.3 Destabilizační moment od větru působícího na věž	45
6.1.4 Destabilizační moment od větru působícího na strojovnu výložníku.....	45
6.1.5 Destabilizační moment od větru působícího na rameno výložníku.....	45
6.2 Výsledný destabilizační moment – určení kritického místa.....	46

6.2.1	Celkový destabilizační moment základní stability	46
6.2.2	Celkový destabilizační moment dynamické stability	46
7	NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - ODSTRANĚNÍ VÝZTUŽÍ	48
7.1	Namáhání věže	48
7.2	Materiál věže a dalších částí jeřábu	48
7.3	Deformační kontrola	50
8	NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - ZKRÁCENÍ VÝZTUŽÍ	54
8.1	Koncepční návrh	54
8.2	Namáhání a deformace věže	57
8.3	Namáhání a deformace základny, podpěr a výztuží	60
8.4	Shrnutí navrhované úpravy	62
9	NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - UPNUTÍ VÝZTUŽÍ PŘÍMO DO VĚŽE	64
9.1	Koncepční návrh úpravy	65
9.2	Vylepšená montáž výztuží	66
9.3	Namáhání věže a výztuží	69
9.4	Deformační kontrola	70
9.5	Kontrola stability upraveného jeřábu	73
9.6	Shrnutí úpravy	74
10	MĚRNÝ TLAK JEŘÁBU NA PODLOŽÍ	76
10.1	Výpočet reakcí v podpěrách	77
10.2	Povolený měrný tlak na podloží	80
10.3	Rozměr styčných desek	80
11	ZÁVĚR	82
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
14	SEZNAM TABULEK	88
15	SEZNAM PŘÍLOH	89

LEGENDA POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	[m]	strana styčných desek
b	[mm]	výška nosného průřezu výztuží
$D_{2,368}$	[m]	vnitřní průměr věže 2,4m se sílou stěny 16mm
$D_{2,4}$	[m]	vnější průměr věže 2,4m
$D_{2,468}$	[m]	vnitřní průměr věže 2,5m se sílou stěny 16mm
$D_{2,5}$	[m]	vnější průměr věže 2,5m
$D_{2,968}$	[m]	vnitřní průměr věže 3m se sílou stěny 16mm
D_3	[m]	vnější průměr věže 3m
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F_{GB}	[N]	gravitační síla od hmotnosti břemene
F_{GP}	[N]	gravitační síla od hmotnosti podvalníku věže
F_{GPP}	[N]	gravitační síla od hmotnosti podpěr
F_{GR}	[N]	gravitační síla od hmotnosti ramene výložníku
F_{GS}	[N]	gravitační síla od hmotnosti strojovny výložníku
F_{GV}	[N]	gravitační síla od hmotnosti věže
F_{GVZ}	[N]	gravitační síla od hmotnosti výztuží
F_N	[N]	napínací síla výztuží
F_P	[N]	součet všech vertikálních sil působících na jeřáb
F_{V20}	[N]	síla od větru působící ve výšce 20m
F_{V30}	[N]	síla od větru působící ve výšce 30m
F_{V40}	[N]	síla od větru působící ve výšce 40m
F_{V50}	[N]	síla od větru působící ve výšce 50m
F_{V60}	[N]	síla od větru působící ve výšce 60m
F_{V70}	[N]	síla od větru působící ve výšce 70m
F_{V80}	[N]	síla od větru působící ve výšce 80m
F_{V90}	[N]	síla od větru působící ve výšce 90m
F_{V100}	[N]	síla od větru působící ve výšce 100m
F_{V110}	[N]	síla od větru působící ve výšce 110m
F_{V120}	[N]	síla od větru působící ve výšce 120m
F_{V130}	[N]	síla od větru působící ve výšce 130m
F_{V140}	[N]	síla od větru působící ve výšce 140m
F_{VO}	[N]	síla nahrazující celkový ohybový účinek na věž
F_{VR}	[N]	výsledná síla od větru působící na skloněné rameno výložníku
F_{VRmax}	[N]	maximální hodnota síly F_{VR} pro plně vysunuté rameno výložníku

F_{VS}	[N]	síla od větru působící na strojovnu výložníku
F_{VT}	[N]	přepočítaná síla v místě upnutí výztuží
F_{VT2}	[N]	síla ve výztuži vyvozená silou F_{VT}
F_{VV}	[N]	výsledná síla od větru působící na věž
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
h	[mm]	šířka nosného průřezu výztuží
H_{L7}	[m]	výška na stranu L_7 výpočetního trojúhelníku výztuží
$I_{2,4}$	[m ⁴]	kvadratický moment průřezu zjednodušené věže o průměru 2,4m
$I_{2,5}$	[m ⁴]	kvadratický moment průřezu zjednodušené věže o průměru 2,5m
I_3	[m ⁴]	kvadratický moment průřezu zjednodušené věže o průměru 3m
k_S	[-]	koeficient bezpečnosti stability jeřábu
L_1	[m]	vzdálenost bodu upnutí ramene výložníku od osy věže
L_4	[m]	vzdálenost od osy věže po uchycení výztuží v podpěře
L_5	[m]	vzdálenost od osy věže po bod uchycení výztuží ke věži
L_6	[m]	vzdálenost od horní části věže po bod uchycení výztuží ke věži
L_7	[m]	délka spodní strany výpočetního trojúhelníku výztuží
L_{CV}	[m]	délka výztuží
L_{CVP}	[m]	délka výztuží po pružné deformaci
L_D	[m]	posunutí vyložení břemene vlivem pružné deformace jeřábu
L_{FV20}	[m]	rameno síly F_{V20}
L_{FV30}	[m]	rameno síly F_{V30}
L_{FV40}	[m]	rameno síly F_{V40}
L_{FV50}	[m]	rameno síly F_{V50}
L_{FV60}	[m]	rameno síly F_{V60}
L_{FV70}	[m]	rameno síly F_{V70}
L_{FV80}	[m]	rameno síly F_{V80}
L_{FV90}	[m]	rameno síly F_{V90}
L_{FV100}	[m]	rameno síly F_{V100}
L_{FV110}	[m]	rameno síly F_{V110}
L_{FV120}	[m]	rameno síly F_{V120}
L_{FV130}	[m]	rameno síly F_{V130}
L_{FV140}	[m]	rameno síly F_{V140}
L_{NR}	[m]	návětrná výška ramene výložníku pro skloněné rameno
L_P	[m]	poloviční obvod trojúhelníku
L_R	[m]	délka ramena výložníku

L_S	[m]	vzdálenost bodu klopení od osy věže
L_{TR}	[m]	vzdálenost těžišti ramene výložníku od bodu uchycení ramene
L_{TR2}	[m]	přepočtená vzdálenost L_{TR} vůči ose věže
L_{TS}	[m]	vzdálenost těžiště strojovny výložníku od osy věže
L_V	[m]	vzdálenost vyložení břemene od osy věže
L_{VO}	[m]	rameno působení síly F_{VO}
L_{VR}	[m]	rameno působení síly F_{VR}
L_{VRmax}	[m]	rameno působení síly F_{VRmax}
L_{VT}	[m]	rameno působení síly F_{VT}
L_{VS}	[m]	rameno působení síly F_{VS}
L_{VV}	[m]	rameno působení síly F_{VV}
L_Z	[m]	výška základny jeřábu
M_A	[Nm]	celkový moment zatěžující věž ohybem
M_K	[Nm]	destabilizační moment působící na jeřáb
M_{Kmax}	[Nm]	maximální destabilizační moment působící na jeřáb
M_{KDS}	[Nm]	destabilizační moment dynamické stability
M_{KDSmax}	[Nm]	destabilizační moment dynamické stability
M_{KN}	[Nm]	destabilizační moment od hmotnosti břemene
M_{KNmax}	[Nm]	maximální destabilizační moment od hmotnosti břemene
M_{KR}	[Nm]	destabilizační moment od hmotnosti ramene výložníku
M_{KRmax}	[Nm]	max. destabilizační moment od hmotnosti ramene výložníku
M_{KRV}	[Nm]	destabilizační moment od větru působícího na rameno výložníku
M_{KRVmax}	[Nm]	max. dest. moment od větru působícího na rameno výložníku
M_{KS}	[Nm]	destabilizační moment od větru působícího na strojovnu výložníku
M_{KV}	[Nm]	destabilizační moment od větru působícího na věž
M_{KZS}	[Nm]	destabilizační moment základní stability
M_{KZSmax}	[Nm]	maximální destabilizační moment základní stability
M_P	[Nm]	součet momentů vůči bodu K od všech sil působících na jeřáb
M_S	[Nm]	stabilizační moment působící na jeřáb
M_{VR}	[Nm]	moment od působení větru na rameno výložníku
m_B	[kg]	hmotnost zdvihaného břemene
m_P	[kg]	hmotnost podvalníku věže
m_{PP}	[kg]	hmotnost podpěr celkem
m_R	[kg]	hmotnost ramene výložníku
m_S	[kg]	hmotnost strojovny výložníku

m_v	[kg]	hmotnost věže
m_{vZ}	[kg]	hmotnost všech výztuží
p	[MPa]	měrný tlak na podloží
p_D	[MPa]	dovolený měrný tlak na podloží
q_{v20}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 20m
q_{v30}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 30m
q_{v40}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 40m
q_{v50}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 50m
q_{v60}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 60m
q_{v70}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 70m
q_{v80}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 80m
q_{v90}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 90m
q_{v100}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 100m
q_{v110}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 110m
q_{v120}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 120m
q_{v130}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 130m
q_{v140}	[N/m ²]	kvazistatický tlak nárazového větru ve výšce 140m
R_{1X}	[N]	horizontální reakce v přední podpěře
R_{2X}	[N]	horizontální reakce v levé podpěře
R_{3X}	[N]	horizontální reakce v pravé podpěře
R_{4X}	[N]	horizontální reakce v zadní podpěře
R_{1Y}	[N]	vertikální reakce v přední podpěře
R_{2Y}	[N]	vertikální reakce v levé podpěře
R_{3Y}	[N]	vertikální reakce v pravé podpěře
R_{4Y}	[N]	vertikální reakce v zadní podpěře
S_1	[m ²]	plocha horní části strojovny výložníku
S_2	[m ²]	plocha střední části strojovny výložníku
S_3	[m ²]	plocha spodní části strojovny výložníku
$S_D; S_{D2}$	[m]	styčná plocha desek a podloží
S_s	[m ²]	celková návětrná plocha strojovny výložníku
S_v	[m ²]	nosná plocha výztuží
S_{v20}	[m ²]	návětrná plocha věže ve výšce 20m
S_{v30}	[m ²]	návětrná plocha věže ve výšce 30m
S_{v40}	[m ²]	návětrná plocha věže ve výšce 40m
S_{v50}	[m ²]	návětrná plocha věže ve výšce 50m

S_{V60}	$[m^2]$	návětrná plocha věže ve výšce 60m
S_{V70}	$[m^2]$	návětrná plocha věže ve výšce 70m
S_{V80}	$[m^2]$	návětrná plocha věže ve výšce 80m
S_{V90}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku výšce 90m
S_{V100}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku ve výšce 100m
S_{V110}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku ve výšce 110m
S_{V120}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku ve výšce 120m
S_{V130}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku ve výšce 130m
S_{V140}	$[m^2]$	návětrná plocha ramene výložníku ve výšce 140m
Y_1-Y_3	$[m]$	vychýlení věže vlivem její deformace
Y_{3C}	$[m]$	celkové vychýlení věže
Y_4	$[m]$	vychýlení věže vlivem deformace výztuží
α	$[^\circ]$	úhel mezi osou věže a výztuží
α_1	$[^\circ]$	úhel sklonění ramene výložníku
ΔL	$[m]$	prodloužení výztuží vlivem pružné deformace
π	$[-]$	Ludolfovo číslo

1 ÚVOD

Vítr. Živel, se kterým se člověk potýká odjakživa. A je to živel, který lidstvu přináší problémy, ale i velký užitek. Je to jeden z nejdéle využívaných obnovitelných zdrojů energie v historii lidstva. Po tisíce let poháněl lodě a pohání je dokonce i dnes. Za pomoci různých větrníků mělo lidstvo možnost mlít mouku, pumpovat vodu z hlubin země, pohánět všemožné stroje a v moderní době i vyrábět elektřinu. Dnes je výroba elektřiny asi největším využitím větru, ostatní stroje hnané větrem dnes nahradily výkonnější stroje, které jsou velmi často poháněny právě elektřinou. K získání elektřiny z větru byla vymyšlena spousta zařízení (elektráren), téměř všechny ale fungují na principu roztáčení rotoru pomocí větru, který dále pohání generátor. Tvarem rotoru a celkovou konstrukcí se jednotlivé elektrárny značně liší, postupem času se ale jako nejvýhodnější ukázala pouze jedna konstrukce, kterou dnes všichni dobře známe. Mohutné sloupy s trojicípo vrtulí o průměru až sto metrů, přesně to si představíme pod dnešním pojmem větrná elektrárna.

Stavba těchto mohutných větrných elektráren je velice náročná na stavební techniku. Přestože je větrná elektrárna rozdělena na několik částí o dané maximální hmotnosti, žádný mobilní jeřáb není natolik výkonný, aby mohl výkonnou větrnou elektrárnu složit. Ke stavbě je zapotřebí výkonnějších jeřábů, které je ale potřeba na místě složit z několika částí. Tyto složité jeřáby se kompletují až desítky hodin a tento čas značně ovlivňuje i celkový čas stavby větrné elektrárny.

Ve své práci se budu zabývat konstrukcí a úpravou jeřábu, který je mimo jiné určen i pro stavbu větrných elektráren. Zaměřím se na jednoduchou konstrukci, z toho vyplývající krátký čas potřebný pro uvedení jeřábu do provozu a rovněž se zaměřím na celkový měrný tlak jeřábu na podloží, neboť kvalitu podloží nelze v místech, kde se větrné elektrárny staví, zaručit.

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Vítr lze na elektrickou energii přeměnit poměrně snadno. Zařízení k tomu určené se nazývá větrná elektrárna. Proudění vzduchu uvádí do pohybu listy rotoru větrníku (vrtule elektrárny). Pohybová energie větru se tak mění na rotační energii. Tato rotační energie se přes převodovku přivádí na elektrický generátor, který vyrábí elektřinu. Protože během procesu dochází ke ztrátám, je účinnost větrné elektrárny přibližně 20-45 %.

Větrné elektrárny jsou ekologické, pracují s obnovitelným zdrojem energie a proto je dnes velký trend tyto elektrárny vystavovat. Návrh politiky ochrany klimatu zpracovaný ministerstvem životního prostředí ČR předpokládá, že do roku 2020 může být v ČR vyrobeno z větru 2,6 GWh elektřiny. To je desetkrát více, než se vyrobilo v roce 2008, avšak v celkové bilanci to jsou jen 3% celkové výroby elektřiny. Odhaduje se, že území české republiky nabízí teoretickou možnost výroby až 6 GWh větrné energie ročně. I při využití tohoto maxima půjde pouze o 7% z celkové výroby elektřiny, protože jde ale o absolutně čistou energii, byla by velká škoda ji nevyužít.

Je samozřejmé, že pro získání takového množství elektřiny z větrných elektráren bude potřeba navýšit jejich počet. Dnes nejčastěji stavěné větrné elektrárny nabízí výkon 2MW. Větrná elektrárna s takovým výkonem pracuje s průměrem vrtule okolo 80m a výška sloupu takové elektrárny je kolem 100m. Vzhledem k tomu, že velká tepelná elektrárna nebo střední jaderná elektrárna nabízí výkon až 1GW, adekvátní náhrada s použitím větrných elektráren by představovala asi 500 větrných elektráren s výkonem 2MW. Ve skutečnosti ovšem větrné elektrárny pracují v průměru 1500-2000 hodin ročně, což je třikrát méně, než běžné tepelné či jaderné elektrárny. Proto by bylo potřeba vystavět 1500 větrných elektráren, aby se jejich výkon vyrovnal tepelné či jaderné elektrárně s výkonem 1GW. Větrných elektráren se tedy staví a bude stavět veliké množství, toto množství potom klade vysoké nároky na stavěcí techniku. Podle doporučení výrobců by se měla vzdálenost jednotlivých větrných elektráren rovnat 5-8 násobku průměru jejich vrtule, což pro 2MW elektrárny představuje vzdálenost 400-640 metrů. Menší rozteč snižuje efektivitu větrných elektráren, protože si navzájem kradou vítr. Z tohoto důvodu je kladen požadavek na velkou mobilnost jeřábů, které elektrárny staví.

Výkony větrných elektráren se pohybují od několika kW až po 10MW. Ty největší větrné elektrárny mají věž z příhradové konstrukce a výšku přesahující 200 metrů. Nejběžnější elektrárny o výkonu 2-3 MW mají výšku věže do 120 metrů.

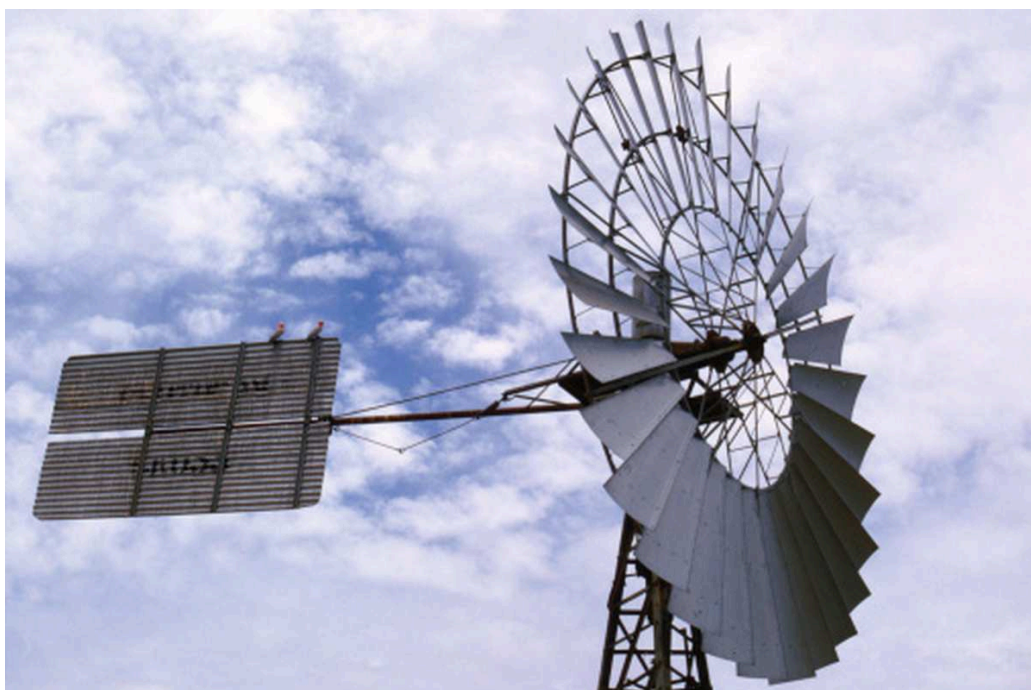
2.1 Typy větrných elektráren

Během doby, co se člověk snaží zkrotit vítr, vzniklo několik typů větrných elektráren. Základním prvkem, kterým se jednotlivé elektrárny liší, je směr osy otáčení vrtule elektrárny. Osa otáčení vrtule může být horizontální, nebo vertikální. Další dělení je podle principu větrného motoru (vrtule) – rozeznáváme vztakové a odporové.

2.1.1 Elektrárny s horizontální osou otáčení

Elektrárny s takto umístěnou osou rotace vrtule jsou dnes nejběžnější. Využívají principu vztaku a jejich lopatky mají podobný profil, jako letecké vrtule. Oproti vertikálním typům nabízí vyšší účinnost, teoretická maximální účinnost vztakové vrtule je 59,3%, reálně se ale maximum u větrných elektráren pohybuje kolem 45%.

Horizontální větrníky se dříve využívaly například k čerpání vody (obr. 1), dnes se využívají k výrobě elektřiny a jedná se o nejrozšířenější typ elektrárny pro výrobu elektřiny (obr. 2). Rotor moderních větrných elektráren má tři lopatky, tento počet nabízí ideální poměr mezi výkonem, vyvážením a dynamickými silami ve vrtuli.



Obr. 2.1 – Klasické větrné kolo, v tomto případě sloužící pro čerpání vody. [7]



Obr. 2.2 – Moderní větrné elektrárny s tří lopatkovým rotorem (vrtulí). [1]

2.1.2 Elektrárny s vertikální osou otáčení

I elektrárny s vertikální osou otáčení rotoru mohou využívat vztakového principu. Nejznámějším typem rotoru fungujícím na tomto principu je Darrierův rotor se dvěma až třemi půlelipovitými aerodynamicky tvarovanými lopatkami (obr. 2.3). Nevýhodou tohoto typu je potřeba silnějšího větru pro rozběh otáčení a menší účinnost. Výhodou je menší průměr rotoru.



Obr. 2.3 – Příklad tří lopatkové vertikální vztakové větrné elektrárny. [7]

Dalším typem jsou elektrárny s odporovým rotorem, nejznámější je Savoniova turbína. Má dvě až tři lopatky, které vytvářejí odpor větru a ten je roztáčí. Tato turbína se roztočí i při velmi malé rychlosti větru, používá se proto jako startovní turbína pro roztočení Darrierova rotoru. Nevýhodou tohoto typu vrtule je nízká účinnost, nejvýše do 20%. Dalším využitím vrtulí jsou tedy jen estetické projekty, případně turbíny s jiným využitím (měření rychlosti větru apod.).



Obr. 2.4 – Savoniova turbína má sice nízkou účinnost, zato může vypadat velice esteticky. [7]

2.1.3 Speciální větrné elektrárny

Patří zde větrné elektrárny, které nemají rotor, a nebo se rotor otáčí v jiném směru, než je vertikální či horizontální. Mezi nejzajímavější bezrotorovou větrnou elektrárnu patří koncept stéblové větrné elektrárny (obr. 2.5). Tento nápad byl navržen pro město Masdar ve Spojených arabských emirátech. Inspiraci pro tento koncept přineslo pozorování přírody, konkrétně pozorování vlnění stébel trávy ve větru. Umělá stébla s průměrem 10-20 cm a výškou 55m by se měla přirozeně vlnit ve větru a prostřednictvím speciálních disků uvnitř stébel vyrábět elektrickou energii. Dalším zdrojem elektrické energie je generátor umístěný v betonovém základu, který získává energii z kývavého pohybu stébel.



Obr. 2.5 – Koncept stéblové větrné elektrárny ve Spojených arabských emirátech. [7]

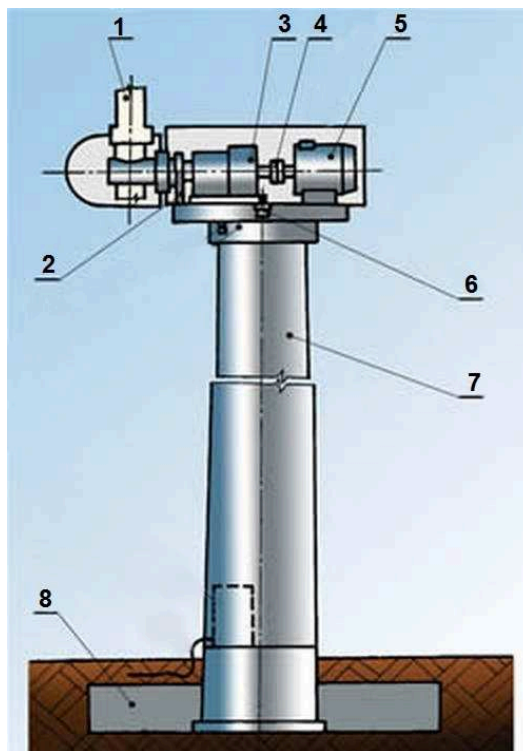
2.2 Konstrukce větrné elektrárny

Vzhledem k drtivé převaze jednoho konceptu větrné elektrárny se budu zabývat konstrukcí právě této větrné elektrárny – vztlakové tří rotorové horizontální elektrárny. Tyto větrné elektrárny se sestávají z několika částí, které se do finálního celku montují na místě, kde má větrná elektrárna stát. Skoro všechny díly se montují pomocí jednoho či více jeřábů.

Větrná elektrárna sestává z (schéma na obr. 2.6) :

- 1) **Rotor s rotorovou hlavicí** – rotor je ta část elektrárny, která přeměňuje proud vzduchu na rotační pohyb. Lopatky jsou vyráběny z laminátu, k hlavici jsou přichyceny šrouby. Hlavice umožňuje naklápění lopatek podle rychlosti větru, a tím se reguluje počet otáček rotoru za minutu. Lopatky se k hlavici montují na místě, kde má elektrárna stát. Sestavený rotor má hmotnost až 40 tun [5]. Montáž rotoru je složitější, neboť rotor po sestavení leží na zemi a napřed je potřeba zvednout ho do svislé polohy, k tomuto je potřeba dvou i více jeřábů najednou.
- 2) **Brzda rotoru** – slouží k sekundární regulaci otáček rotoru a k zastavení rotoru v případě potřeby.

- 3) **Planetová převodovka** – zvyšuje počet otáček rotoru na potřebný počet otáček pro generátor.
- 4) **Spojka**
- 5) **Generátor**
- 6) **Servopohon natáčení strojovny** – umožňuje natáčení strojovny, aby byly lopatky rotoru vždy proti směru proudění větru. Strojovna má hmotnost až 70 tun [5].
- 7) **Několikadílná věž elektrárny** – tvoří nosný prvek elektrárny. Je vyráběna ze svařovaných skružených profilů. Pro převoz je věž rozdělena na několik částí, maximální délka jedné části je 30 metrů a maximální váha jedné části 70 tun [16] [17]. Průměr věže bývá až 4,5 metrů [6]. Na místě se jednotlivé části k sobě připevňují šrouby. Spodní díl se připevňuje k betonové základně. Uvnitř věže je žebřík umožňující přístup do strojovny.
- 8) **Betonový základ** – tento základ se vyrábí přímo na místě, kde má elektrárna stát. Je vyztužený stavební ocelí a schovaný pod zeminou. Pro jeho výrobu je tedy potřeba vykopat potřebnou jámu, vytvořit formu základu, sestavit ocelovou výztuž, nalít beton a počkat, až beton vytvrdne. Poté se základ zasype zeminou a nad ní zůstane pouze část pro připevnění věže. Betonový základ je zodpovědný za stabilitu celé elektrárny [5].



Obr. 2.6 – Schéma větrné elektrárny. [18]

Postup montáže větrné elektrárny, předpoklad hotového základu a dovezení všech potřebných dílů:

- I.** Na betonový základ se nasadí první díl věže, tento díl se poté pevně spojí se základem. Díl je nasazován pomocí jeřábu, váží maximálně 70 tun, výška tohoto dílu je maximálně 30 metrů, předpokládaná zdvihová výška jeřábu je okolo 35 metrů.
- II.** Na první díl se nasadí druhý díl věže. Parametry dílu podobné jako u prvního dílu, tedy max. 70 tun a 30 metrů. Předpokládaná zdvihová výška jeřábu je okolo 65 metrů. Podobně se nasadí i další díly věže, pro třetí část je předpokládaná výška zdvihu 95 metrů a pro čtvrtou část maximálně okolo 125 metrů. Vyšší věže tubusové konstrukce se vyskytují výjimečně.
- III.** Na hotovou věž se nasadí a následně přimontuje strojovna. Hmotnost strojovny je většinou do 70 tun, maximální potřebná výška zdvihu jeřábu pro montáž strojovny je 130 metrů.
- IV.** Na zemi se zkompletuje vrtule, poté se za pomocí hlavního a pomocného jeřábu zdvihne nad zem, kde je převrácena do svislé polohy. Poté je již jenom hlavním jeřábem vyzdvižena až ke strojovně, ke které se přimontuje. Předpokládaná maximální výška zdvihu jeřábu pro montáž vrtule je 130 metrů a dosah ramena jeřábu 40 metrů. Ojediněle se vrtule kompletuje až na strojovně (například u enormně rozměrných vrtulí), tento proces je méně náročný na jeřábovou techniku, ale je zdlouhavější a nebezpečnější pro techniky (více montáže ve vysoké výšce).

3 JEŘÁBY PRO MONTÁŽ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Jednotlivé části větrných elektráren jsou poměrně těžké, velmi rozměrné a vyžadují usazení s přesností na milimetry. Větrné elektrárny se navíc sestaví v poměrně krátké době, zkušené firmy zvládají tuto montáž během jediného dne. Přípravy jeřábu by tedy neměly zbytečně prodlužovat tuto potřebnou pracovní dobu. Tyto fakta kladou specifické požadavky na jeřáby, které jsou vhodné pro stavbu větrných elektráren.

3.1 Požadavky na jeřáby pro stavbu větrných elektráren

- **Mobilita:** Větrné elektrárny se staví na spoustě místech, velmi často to bývá v terénu mimo civilizaci, kde není ideální přístup. Jeřáb se tedy musí dostat i do těžce přístupných míst a ideálně bez pomoci dalších strojů a v krátkém čase. Větrných elektráren se často staví více najednou, tyto elektrárny jsou ale od sebe vzdáleny stovky metrů, po každé stavbě je tedy potřeba jeřáb přemístit, a každá hodina navíc prodražuje stavbu větrných elektráren. Jeřáb by měl být schopen přepravovat se po klasických komunikacích bez nutnosti omezení provozu vlivem nadměrných rozměrů. Přípustná šíře přepravovaného zařízení pro jeden pruh komunikace je 3 metry.
- **Čas potřebný pro montáž a uvedení v činnost:** Jak již bylo zmíněno, při stavbě větrných elektráren se velice dbá na co nejkratší čas potřebný pro stavbu. Zvláště pak pokud se staví více elektráren najednou (v praxi desítky i stovky elektráren). Po příjezdu jeřábu na místo stavby je potřeba uvést jeřáb do provozu. Žádný mobilní jeřáb bez nutnosti montáže není schopen stavět velké větrné elektrárny, používá se tedy jeřábů, které se skládají z více částí a tak je nutno napřed jeřáb na místě sestavit. Jeřáb se po práci musí zase rozebrat, přemístit na novou pozici, a opět složit. Montáž a demontáž jeřábu by tedy měla být co nejjednodušší a rychlá. Hodina navíc u montáže jeřábu může při stavbě více elektráren prodloužit celkovou dobu i o několik dní.
- **Potřebná zdvihací síla a výška:** Jednotlivé části nejběžnějších větrných elektráren (výkon 2-3 MW) váží okolo 70 tun, větší elektrárny ale mohou mít jednotlivé části i těžší. S váhou si jeřáby poradí docela snadno, používané jeřáby zvládají v ideálních podmínkách hmotnosti i přes 600 tun. Problém nastává u potřebné zdvihací výšky. Většina elektráren vyžaduje zvedání komponent do výšky okolo

110 metrů, větší elektrárny pak do výšky 130 metrů a více. Je tedy potřeba prodloužit ramena jeřábů, nebo použít pomocné prodlužující výložníky, není totiž jeřáb, který by se základním výložníkem dosáhl této výšky při potřebné zdvihací síle. Jeřáb tedy musí mít možnost podobné úpravy.

- **Tlak na podloží:** Větrné elektrárny se staví v terénu (pole, louky, kopce či jiná vyvýšená místa, pobřeží apod.) často s neupravenou půdou, je tedy potřeba myslet na měrný tlak jeřábu na podloží aby neztratil stabilitu, a aby byl schopen se vůbec dostat k potřebnému místu stavby. Větrné elektrárny se staví po celý rok, může se tak stát, že stavba bude probíhat po dešti, kdy bude půda promáčená a tedy s menší únosností. Stavby se odkládají jen v extrémní nepřízni počasí. Často se tedy stává, že jeřábům na podmáčené půdě pomáhají dozery či jiná těžká technika, aby se dostaly na místo stavby.
- **Dosah výložníku při plném zatížení:** U jeřábů se snižuje maximální nosnost jeřábu s délkou vyložení břemene. Jeřáb tedy musí být schopen operovat s břemenem o hmotnosti 70 tun (v ideálním případě i více) do určité vzdálenosti. Tato vzdálenost u větrných elektráren není nijak velká, neboť je možné umístit jeřáb těsně vedle základny větrné elektrárny. Odhadovaná maximální potřeba délky vyložení je 14 metrů.
- **Stabilita a deformace:** Jeřáb musí být dostatečně stabilní pro práci s nejtěžšími částmi elektrárny i na měkčím podloží, a musí nabízet i přesné uložení těchto komponent, z čehož vyplývá i nárok na nízkou pružnou deformaci celé konstrukce jeřábu a tedy na jeho vysokou tuhost.
- **Účinky větru:** Z důvodu potřebné velké výšky jeřábů je i velká jejich návětrná plocha, která má navíc velké destabilizační rameno. Je tedy potřeba počítat i s nárazovým větrem, který se opírá do konstrukce jeřábu, a to i během manipulace s těžkými břemeny. Nepředpokládá se, že by se větrné elektrárny stavěly v místech, kde je nízká větrná činnost, je tedy u těchto jeřábů potřeba počítat se silnějším větrem a přizpůsobit tomu stabilizační schopnosti jeřábu.

3.2 Jeřáby s pásovým podvozkem

Tyto jeřáby patří k těm nejvýkonnějším ze všech, ty největší si poradí se závažími o hmotnosti přes 1000 tun. Ramena těchto jeřábů (obr. 3.1) jsou příhradových konstrukcí a nabízí široké možnosti úprav jeřábu co do výšky, tak i do délky vyložení. Ramena je možné upravovat vložením různých mezikusů, či přimontováním nadstavců. Přehled možných řešení ramen jednoho typu jeřábu je na obr. 3.2. Z těchto možností lze vybrat optimální variantu pro montáž dané větrné elektrárny. Tento jeřáb se ke stavbám větrných elektráren používá i v ČR. Jeřáby těchto konstrukcí vyrábí spousta firem, rovněž modelů lišících se nosností je velká řada.



Obr. 3.1 – Masivní jeřáb s příhradovými rameny a pásovým podvozkem. [1]

Výhody pásových jeřábů s příhradovými rameny:

- + Obrovská nosnost (ale pro větrné elektrárny až zbytečná) a tedy možnost stavby těch největších větrných elektráren.
- + Široká možnost úprav ramen a výložníků.
- + Možnost pojezdu s břemenem.
- + Možnost přejezdu sestaveného jeřábu bez nutnosti jeřáb rozebrat. Tento přejezd je ale omezen nízkou rychlostí a překážkami na dráze (elektrické vedení, silnice, potoky a řeky, lesy apod.).

Nevýhody pásových jeřábů s příhradovými rameny:

- Složitá a zdlouhavá montáž jeřábu, složitější než u jiných typů, neboť je potřeba sestavit i podvozek. Na druhou stranu ale není nutné montovat podpěry, neboť tuto funkci nahrazuje sám podvozek.
- Nízká základní stabilita jeřábu, nutnost přidávat protizávaží, což prodlužuje čas montáže.
- Hlavní výložník se svou hmotností projevuje pouze jako destabilizační člen (nutnost přidávat více protizávaží).
- Zdlouhavější montáž příhradových ramen pro velké zdvihací výšky.
- Jednotlivé části jeřábu zabírají více místa a je tedy potřeba více vozidel na jeho přepravu.
- Kvůli nutnosti velkého množství protizávaží vysoká celková hmotnost jeřábu. Díky pásovému podvozku je ale hmotnost lépe rozložena na podloží.



Obr. 3.2 – Široké možnosti sestavení ramen a výložníků. [11]

3.3 Jeřáby s kolovým podvozkem a příhradovými rameny

Tyto jeřáby jsou velice podobné jako pásové jeřáby s příhradovými rameny (kapitola 3.2), liší se pouze provedením podvozku. Díky kolovému podvozku (obr. 3.3) je základní část jeřábu přemístitelná po silnici a odpadá potřeba kompletace podvozku. Je zde ale nutnost přimontovat k základní části jeřábu podpěry, výsledný montážní čas je ale přesto oproti pásovým jeřábům o něco kratší. I tyto jeřáby jsou používány pro montáž větrných elektráren na území ČR.



Obr. 3.3 – Kolový jeřáb s příhradovými rameny od firmy Demag. [1]

Výhody kolových jeřábů s příhradovými rameny:

- + Obrovská nosnost (ale pro větrné elektrárny až zbytečná) a tedy možnost stavby těch největších větrných elektráren.
- + Široká možnost úprav ramen a výložníků.
- + Podvozek je součástí jeřábu i po kompletaci a jeho hmotnost působí v těžišti jeřábu, což snižuje potřebnou hmotnost protizávaží. Přesto je nutnost přidávat protizávaží.

Nevýhody kolových jeřábů s příhradovými rameny:

- Složitá a zdlouhavá montáž jeřábu, sice o něco jednodušší než u pásových jeřábů, ale stále složitější a zdlouhavější než u jiných typů.
- Stále nutnost přidávat protizávaží, což prodlužuje čas montáže.
- Hlavní výložník se svou hmotností projevuje pouze jako destabilizační člen (nutnost přidávat více protizávaží).
- Zdlouhavější montáž příhradových ramen pro velké zdvihací výšky.
- Jednotlivé části jeřábu zabírají více místa a je tedy potřeba více vozidel na jeho přepravu.
- Kvůli nutnosti velkého množství protizávaží vysoká celková hmotnost jeřábu.
- Nemožnost pojezdu či přejezdu sestaveného jeřábu.
- Horší rozložení hmotnosti na podloží než u pásových jeřábů, nutnost používat desky pod podpěry pro rozložení hmotnosti.

3.4 Jeřáby s kolovým podvozkem a teleskopickým ramenem

U těchto jeřábů je hlavní rameno teleskopické tubusové konstrukce (obr. 3.4), které pro práci často nepotřebuje dalších úprav. Tyto jeřáby jsou velice rozšířené, podpěry bývají často součástí jeřábu a před prací je stačí pouze vysunout, což nabízí rychlé operační časy a oproti předchozím jeřábům je určen pro zvedání méně těžkých břemen, ale s častějším přesunem. Nejvyšší modely nabízí vysoké nosnosti (přesto nižší než u jeřábů s příhradovými rameny) až přes 500 tun, u těchto jeřábů je ale již nutnost montovat přídavné větší podpěry. Pro práci s velkými zdvihacími výškami se tyto jeřáby vybavují přídavnými výložníky, neboť hlavní rameno nenabízí dostatečné výšky. To platí i pro montáž větrných elektráren. S použitím přídavného nosníku funguje hlavní rameno podobně jako věž u věžového jeřábu a o vyložení se stará přídavný výložník. Přídavné výložníky bývají příhradových konstrukcí a značně prodlužují čas potřebný pro uvedení jeřábu v činnost. Tyto jeřáby se rovněž používají ke stavbě větrných elektráren na území ČR, jejich použití je ale spíše na elektrárny nejtypičtějších výkonů (2-3MW), na největší elektrárny se nepoužívají.



Obr. 3.4 – Kolový jeřáb s teleskopickým ramenem od firmy Demag. [1]

Výhody kolových jeřábů s teleskopickými rameny:

- + Vysoká nosnost, stačí na stavbu většiny elektráren, ke stavbě těch největších se ale používají spíše jeřáby s příhradovými rameny.
- + Široká možnost nadstaveb pro hlavní rameno, tyto nadstavby jsou nutností pro stavbu větrných elektráren.
- + Podvozek je součástí jeřábu i po kompletaci a jeho hmotnost působí v těžišti jeřábu, což snižuje potřebnou hmotnost protizávaží. Přesto je nutnost přidávat protizávaží.
- + Pokud je hlavní rameno schopno vztyčit se až do svislé polohy, působí celá hmotnost jako stabilizační prvek jeřábu a není nutno používat tolika protizávaží.
- + Rychlejší čas pro uvedení jeřábu v činnost než u jeřábů s příhradovými rameny, neboť hlavní rameno je součástí základu jeřábu a nemusí se kompletovat.

Nevýhody kolových jeřábů s příhradovými rameny:

- Složité pomocné výložníky velmi prodlužují čas montáže, hlavně pak jejich složitý systém prolanování. Celkově je ale příprava ramen rychlejší, než u jeřábů s oběma příhradovými rameny.
- Stále nutnost přidávat protizávaží, což prodlužuje čas montáže.
- Pokud hlavní rameno není schopno vztyčit se až do svislé polohy, nepůsobí natolik jako stabilizační prvek a je potřeba použít více protizávaží.
- Nemožnost pojezdu či přejezdu sestaveného jeřábu.
- Horší rozložení hmotnosti na podloží než u pásových jeřábů, nutnost používat desky pod podpěry pro rozložení hmotnosti.

3.5 Kolový věžový jeřáb s teleskopickou věží

Tento jeřáb je kombinací věžového jeřábu a kolového mobilního jeřábu. Vyrábí jej firma Grove a existuje zatím v jediné verzi GTK 1100. Je určen pouze pro zvedání do vyšších výšek, není natolik univerzální jako jeřáby s teleskopickým ramenem. Tento jeřáb vyniká rychlou montáží pro použití ke stavbě větrných elektráren, přesto má tento jeřáb konstrukční rezervy a proto jsem si jej vybral jako základ pro mou diplomovou práci. Podrobněji je tento jeřáb popsán v samotné kapitole 4 a v dalších kapitolách budou popsány možnosti konstrukčních úprav a jejich vliv na čas montáže a pevnost jeřábu.

Výhody jeřábu GTK 1100:

- + Ze všech jeřábů nejrychlejší čas montáže do přípravy jeřábu k práci. Tato výhoda je velmi důležitá při stavbě více elektráren najednou.
- + Všechny části jeřábu (až na některé pozice výložníku) působí jako stabilizační členy, spolu s velkými podpěrami tedy není nutnost používat protizávaží, což se pozitivně projevuje na montážním čase.
- + Díky stabilizačním táhlům největší potenciál pro pevnou a tuhou konstrukci jeřábu.
- + Ze všech používaných jeřábů vyžaduje nejmenší plochu potřebnou pro montáž jeřábu.
- + Menší počet dílčích částí jeřábu snižuje jak montážní nároky, tak i počet vozidel, které části jeřábu převáží.
- + Svislá nosná věž jeřábu umožňuje postavit jeřáb těsněji k základně větrné elektrárny.
- + Ovládací kabina má samostatný pojezd a ovládá jeřáb dálkově, což nabízí bezpečnější a přesnější ovládání jeřábu.

Nevýhody kolových jeřábů s příhradovými rameny:

- Maximální nosnost 139 tun je menší než u předchozích jeřábů, stále je ale dostatečná pro stavbu většiny větrných elektráren.
- Nemožnost pojezdu či přejezdu sestaveného jeřábu.
- Menší univerzálnost než u předchozích jeřábů.

4 JEŘÁB GROVE GTK 1100

Sama firma představuje tento jeřáb (obr. 4.1) jako *unikátní jeřábový systém pro náročné projekty, jakými jsou například stavba větrných elektráren, stavební práce na výškových budovách, stavba věžových jeřábů a stavby ve velmi omezeném prostoru do výšky (ulice velkých měst, výrobní komplexy, chemické provozy, chladicí věže, elektrárny...).*

[12]



Obr. 4.1 – Mobilní věžový jeřáb GTK 1100 s plně vysunutou věží [15]

4.1 Parametry jeřábu [12]

- Nosnost 139 tun při plně vysunuté věži.
- Hydraulicky vysouvaný výložník i věž, věž do výšky 76,5 metrů a výložník do délky 16 – 60 metrů. Maximální zdvihací výška 136 metrů.
- Průměr spodní části věže 2,15 metrů, každá následující sekce věže má o 100 mm menší průměr.
- Obrysový čtverec podpěr 18 x 18 metrů, čtverec stabilizačních bodů podpěr o rozměru 17,5 x 17,5 metrů.
- Možnost protiváhy až 60 tun, protiváha umístěna na pomocném navijáku v zadní části strojovny výložníku.
- Pro přejezd demontovatelný na 4 až 6 kamiónů podle toho, jestli je hlavní věž rozdělena na dvě části (menší tlak na podloží) nebo jestli je věž převážena v celku, a podle toho, jestli se převáží ještě nějaké doplňkové vybavení jeřábu.
- Po příjezdu na pracoviště je jeřáb připraven k práci do 6ti hodin.
- Věž jeřábu je zpevněna čtyřmi výztužemi. Výztuže jsou složeny ze sekcí spojených klouby. Výztuže jsou ukotveny na pomocných ramenech na horní části věže, a na podpěrách. Každá výztuž je předeprnuta silou 250kN.

4.2 Proces montáže jeřábu

Celý proces montáže jeřábu je popsán v příloze A [12]. Proces montáže trvá do 6ti hodin, přesný výpis činností a jejich časů je v následující tabulce.

Tabulka činností a potřebných časů:

Tabulka činností a časů byla vypracována na základě informací přímo od výrobce jeřábu Grove.

Legenda k tabulce : Modré buňky – demontáž jeřábu

Žluté buňky – montáž jeřábu

Červené buňky – ztrátový čas oproti plánu

Zelené buňky – ziskový čas oproti plánu

Tabulka 1 : montážní operace a čas potřebný pro jejich provedení. [9]

číslo operace	název operace	plánovaný čas (min)	reálný čas (min)	porovnání časů (min)
1	spuštění věže	30	70	+ 40
2	demontáž ramen výztuh 1 a 4	48	21	- 27
3	demontáž ramen výztuh 2 a 3	48	31	- 17
4	odchod pracovníků z věže	12	20	+ 8
5	spuštění věže do vodorovné polohy	48	50	+ 2
6	demontáž výložníku z věže	24	145	+ 109
7	parkování přívěsu a uložení výložníku	12		
8	demontáž podpěr věže 1 a 2	36	50	+ 14
9	demontáž podpěr věže 3 a 4	36	40	+ 4
10	příprava GTK 1100 k opuštění pracoviště	12	25	+ 13
11	příprava GTK pro montáž na pracovišti	48	50	+ 2
12	montáž podpěr věže 1 a 2	48	52	+ 4
13	montáž podpěr věže 3 a 4	48	30	- 18
14	příprava k montáži výložníku	10	37	+ 27
15	montáž výložníku na věž	36	115	+ 79
16	zvednutí věže do svislé polohy	57	60	+ 3
17	příprava pro montáž výztuh	27	36	+ 9
18	montáž ramen výztuh 1 a 4	54	48	- 6
19	montáž ramen výztuh 2 a 3	54	40	- 14
20	vysunutí věže	18	60	+ 24
21	závěrečné přípravy k práci	18		
	demontáž celkem	306	452	+ 146
	montáž celkem	418	528	+ 110
	celkem	724	980	+ 256

Čas montáže a demontáže by měl být roven šesti hodinám, tedy 360 minut. Reálný čas je ale delší, konkrétně průměrně 490 minut, tedy 8,15 hodin. Tento výsledný ztrátový čas může být dán zbytečně složitou montáží některých částí, kdy se při návrhu těchto částí nepočítalo s tím, že by byla jejich montáž v reálu takto časově náročná.

Výsledný reálný čas nevyhovuje ani výrobci jeřábu, tedy firmě Grove. Firma vydala prohlášení, že by ráda uzpůsobila konstrukci jeřábu pro zrychlení času jeho montáže [9]. Firma Grove by ráda docílila snížení montážního času o minimálně 10%, tedy o minimálně 49 minut. Rozhodl jsem se proto vzít si tento jeřáb jako základ pro svou diplomovou práci, navrhnout změny konstrukce jeřábu pro zrychlení montáže a provést pevnostní výpočty změněných částí pro zachování nosnosti a schopností jeřábu.

4.3 Navrhované časové úspory jeřábu GTK 1100

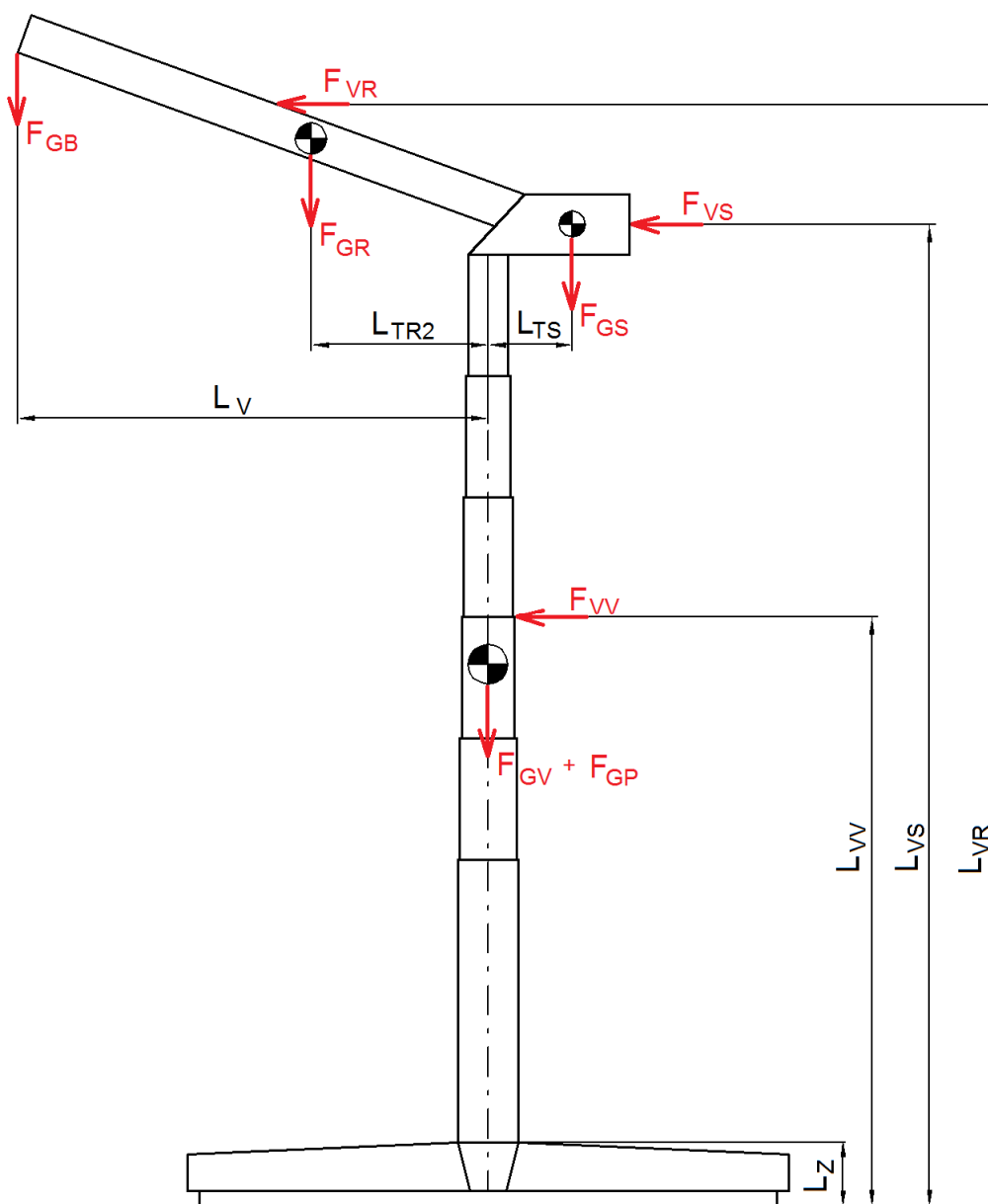
Na základě studie konstrukce jeřábu, jeho postupu montáže a jednotlivých časových úseků montáže jsem navrhl několik možností, jak změnit konstrukci jeřábu či jeho částí za účelem snížení času montáže. Pro některé úpravy by bylo potřeba získat další informace od výrobce. Jednotlivými úpravami se budu podrobněji zabývat v samostatných kapitolách.

- I. Úprava montáže výložníku** – Montáž a demontáž výložníku představuje největší ztrátu času oproti plánu. Úpravou konstrukce a montáže výložníku by bylo možné zkrátit potřebný čas. Nebyl jsem ale schopen zjistit, proč je montáž a demontáž výložníku tak zdlouhavá, proto jsem nebyl schopen navrhnout zlepšení.
- II. Odstranění výztuží** – Výztuže zpevňují celý jeřáb, je zde ale možnost zesílit věž jeřábu a výztuhy včetně jejich upínacích ramen vyloučit. Touto úpravou by bylo možné dosáhnout úspory času zhruba **110** minut.
- III. Zkrácení výztuží** – Pokud by výztuže zpevňovaly pouze spodní část věže, kde je jich nejvíce potřeba, zkrátil by se čas jejich. Přepokládaná úspora času je zhruba **90** minut.
- IV. Upnutí výztuží přímo do věže, bez použití ramen** – Pokud by se odstranily ramena výztuží a ty se upínaly přímo na věž, zjednodušila by se tím jejich montáž a došlo by ke zkrácení času o zhruba **60** minut. Spolu s optimalizovaným procesem montáže výztuží by bylo možné dosáhnout úspory času zhruba **90** minut.

5 ZATÍŽENÍ JEŘÁBU

Aby bylo možné ověřit výpočetně pevnost a stabilitu jeřábu po navrhovaných úpravách, je potřeba detailně určit všechna zatížení, která na jeřáb působí. Tato zatížení jsou zobrazeny na obr. 5.1. Zatížení a destabilizační síly které působí na jeřáb jsou:

- od hmotnosti břemene
- od hmotnosti vysunutého výložníku a strojovny výložníku
- od působení větru
- od samotné hmotnosti věže, podpor a výztuh jeřábu (nepůsobí destabilizačně)



Obr. 5.1 – Schéma zatížení jeřábu od všech sil sil.

5.1 Zatížení jeřábu od břemene

Dovolené hmotnosti břemen jsou závislé na délce vyložení a na délce vysunutí výložníku, níže je tabulka hodnot přímo od výrobce. Pro zachování schopností jeřábu ho budu dimenzovat na tyto hodnoty.

Tabulka 2 : nosnost jeřábu pro různé polohy vyložení (v tunách). [12]

délka vyložení (m)	vysunutí výložníku (m)									
	16,02	20,85	25,68	30,5	35,33	40,15	44,98	49,8	54,63	60
3	139	128								
4	139	128	117							
5	139	128	117	117						
6	139	128	117	117	106					
7	139	128	117	117	106	90				
8	128	127	117	117	106	90	74			
9	117	116	117	117	106	90	74	61		
10	105	104	105	106	106	89	74	61	52	
11	94,5	93,5	94,5	95,5	97	84	73,5	61	52	43
12	86	85	85,5	87	88	79	70,5	61	52	43
13	78,5	77,5	78,5	79,5	81	74,5	67	61	52	43
14		71	72	73	74,5	70,5	63,5	58	52	43
15		65	66	67	68,5	67	60,5	55,5	51,5	43
16		60	61	62	63,5	63	57,5	53	49	43
18			52,5	53,5	55	54	51,5	47,5	45	41,5
20			45,5	46,5	48	47,5	47	44	41,5	38,5
22			40	41	42,5	41,5	42	40	38	35
24				36,5	38	37	37	36,5	35	32,5
26				32,5	34	33	33,5	33,5	32	30
28					30,5	29,5	30	30,5	30	28
30					27,5	27	27	27,5	27,5	26
32					25	24	24,5	25	26	24
34						22	22	22,5	23,5	22,5
36						19,9	20	20,5	21,5	20,5
38							18,2	18,8	19,7	19,5
40							16,6	17,2	18,1	18,2
42								15,7	16,6	16,8
44								14,4	15,2	15,5
46								13,2	14	14,2
48									12,9	13,1
50									11,9	12,1
52										11,2
54										10,3
56										9,5

5.2 Zatížení jeřábu od hmotnosti vysunutého výložníku

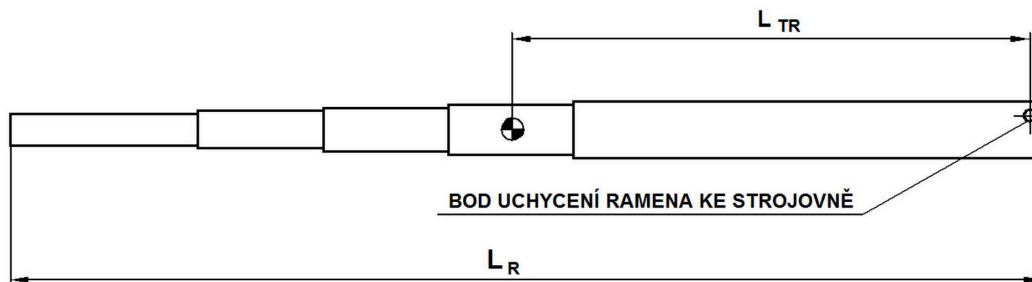
Samotný výložník se skládá ze dvou částí – teleskopické rameno výložníku (složené z pěti sekcí), a strojovna výložníku. Strojovna zůstává vůči věži v neměnné pozici, zatímco rameno výložníku může být naklápěno a vysunováno, čímž se mění vliv jeho hmotnosti na stabilitu a zatížení celého jeřábu.

Hmotnosti částí výložníku [12]:

- Rameno výložníku: $m_R = 41,9$ tun
- Strojovna výložníku: $m_S = 13,3$ tun

Vliv výložníku je závislý na délce jeho vysunutí a na délce vyložení břemene. Je tedy potřeba určit těžiště výložníku pro každou pozici z tabulky 2: nosnost jeřábu (kapitola 5.1).

Těžiště vysunutého ramena výložníku není ve středu jeho délky, neboť každá ze sekcí výložníku má jiný rozměr, kde největší je první část výložníku (viz obr. 5.2).



Obr. 5.2 – Schéma umístění těžiště ramena výložníku.

Vzdálenost těžiště ramena výložníku L_{TR} od bodu uchycení ramena ke strojojně byla zjištěna z počítačového 3D modelu výložníku v programu Inventor. Tento model byl vytvořen pro všechny délky výložníku (L_R), tedy pro délku od 16,02 metru až po 60 metrů. Jednotlivé hodnoty těžišť pro všechny délky jsou v tabulce:

L_R (m)	16,02	20,85	25,68	30,5	35,33	40,15	44,98	49,8	54,63	60
L_{TR} (m)	7,53	9,8	12,07	14,03	16,25	18,47	20,69	22,41	24,58	27,2

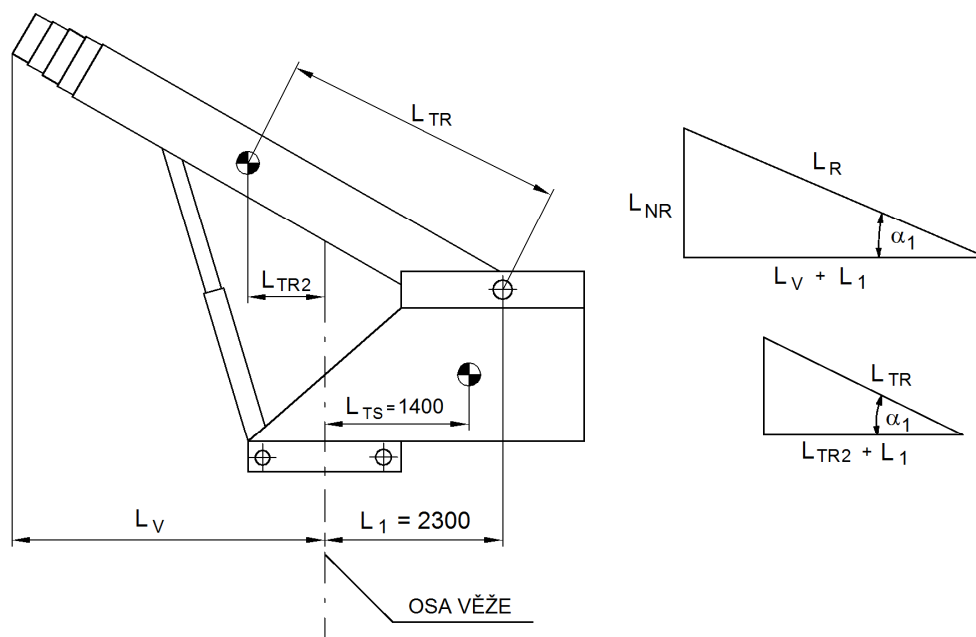
Vzdálenost k těžišti ramena výložníku je potřeba přepočítat vůči ose věže (vzdálenost L_{TR2}), k této ose se totiž budou počítat účinky ramena na pevnost a stabilitu jeřábu. Celkovou polohu výložníku a tedy i jeho těžiště určuje jeho délka vysunutí L_R a vzdálenost vyložení břemene L_V . Všechny možné polohy výložníku jsou brány z tabulky 2: nosnost jeřábu z kapitoly 5.1. Schéma na obrázku 5.3.

Příklad výpočtu L_{TR2} pro $L_V = 3000$ mm a $L_R = 16\,020$ mm, L_{TR} je tedy 7 530 mm :

$$\cos \alpha_1 = \frac{L_V + L_1}{L_R} = \frac{L_{TR2} + L_1}{L_{TR}} \Rightarrow L_{TR} \cdot \frac{L_V + L_1}{L_R} = L_{TR2} + L_1 \Rightarrow L_{TR2} = L_{TR} \cdot \frac{L_V + L_1}{L_R} - L_1 \quad (5.1)$$

$$L_{TR2} = 7530 \cdot \frac{3000 + 2300}{16020} - 2300 = 191 \text{ mm}$$

Tabulka výsledků pro všechny polohové kombinace ramena výložníku je v příloze B1.



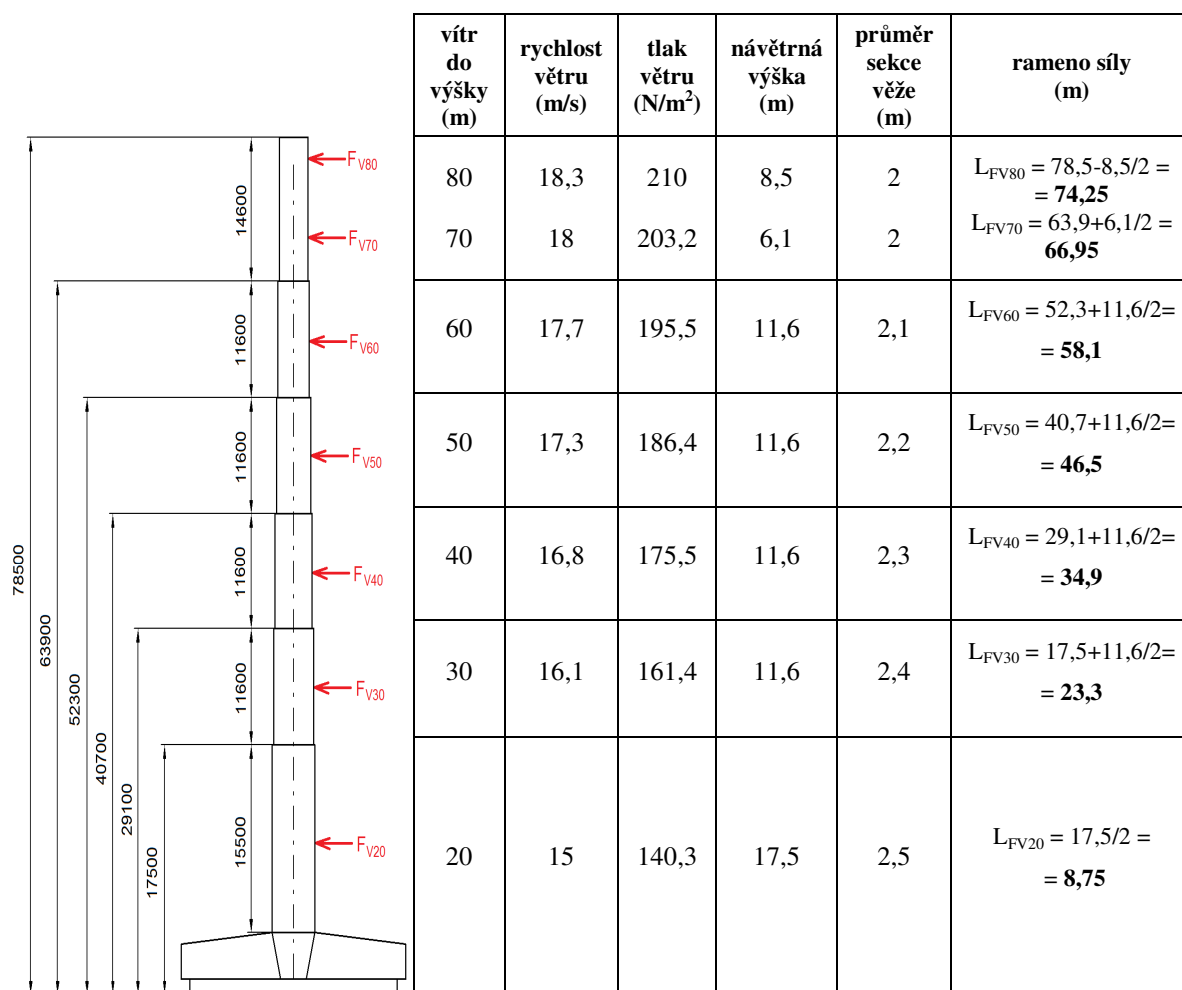
Obr. 5.3 – Schéma pro určení těžiště ramena výložníku a strojovny vůči ose věže.

5.3 Zatížení jeřábu od větru

Vliv větru na pevnost a stabilitu jeřábu je počítán dle normy ČSN EN 13000 [zdroj 3 příloha N]. Původní jeřáb byl schopen pracovat při větru až 11 m/s, budu tedy počítat s touto rychlostí větru. Síla větru roste s výškou od země, norma proto doporučuje počítat vliv na konstrukce po výškových úsecích 10 metrů. Rovněž je potřeba určit návětrné plochy všech částí jeřábu. Působení větru je v nejnevýhodnější pozici, tedy na zadní část jeřábu, kde se destabilizační moment od větru sčítá s ostatními destabilizačními momenty.

5.3.1 Působení větru na věž jeřábu

Věž jeřábu je rozdělena na šest sekcí, každá z nich má jiný průměr a jinou výšku nad zemí, vliv větru je tedy potřeba určit pro každou z těchto sekcí, schéma na obr. 5.4. Původní průměr věže jeřábu je 2,15 metrů pro základní sekci, z důvodu změny konstrukce jeřábu byl ale průměr věže zvětšen na 2,5 metru, vliv větru bude počítán pro tuto zpevněnou věž.



Obr. 5.4 – Schéma zatížení věže větrem. Zobrazeny jsou dílčí síly, délky vysunutí jednotlivých sekcí a tabulka hodnot větru.

Výpočet dílčích sil od působení větru:

$$F_{V20} = q_{V20} \cdot S_{V20} = 140,3 \cdot 17,5 \cdot 2,5 = 6138,1N \quad (5.2)$$

$$F_{V30} = q_{V30} \cdot S_{V30} = 161,4 \cdot 11,6 \cdot 2,4 = 4493,4N \quad (5.3)$$

$$F_{V40} = q_{V40} \cdot S_{V40} = 175,5 \cdot 11,6 \cdot 2,3 = 4682,3N \quad (5.4)$$

$$F_{V50} = q_{V50} \cdot S_{V50} = 186,4 \cdot 11,6 \cdot 2,2 = 4756,9N \quad (5.5)$$

$$F_{V60} = q_{V60} \cdot S_{V60} = 195,5 \cdot 11,6 \cdot 2,1 = 4762,4N \quad (5.6)$$

$$F_{V70} = q_{V70} \cdot S_{V70} = 203,2 \cdot 6,1 \cdot 2 = 2479N \quad (5.7)$$

$$F_{V80} = q_{V80} \cdot S_{V80} = 210 \cdot 8,5 \cdot 2 = 3570N \quad (5.8)$$

Celková síla na věž od působení větru:

$$F_{VV} = F_{V20} + F_{V30} + F_{V40} + F_{V50} + F_{V60} + F_{V70} + F_{V80} = 6138,1 + 4493,4 + 4682,3 + 4756,9 + 4762,4 + 2479 + 3570 = 30882,1N \quad (5.9)$$

Adekvátní rameno síly F_{VV} :

$$\sum M_{VV} = 0$$

$$F_{V20} \cdot L_{FV20} + F_{V30} \cdot L_{FV30} + F_{V40} \cdot L_{FV40} + F_{V50} \cdot L_{FV50} + F_{V60} \cdot L_{FV60} + F_{V70} \cdot L_{FV70} + F_{V80} \cdot L_{FV80} = F_{VV} \cdot L_{VV}$$

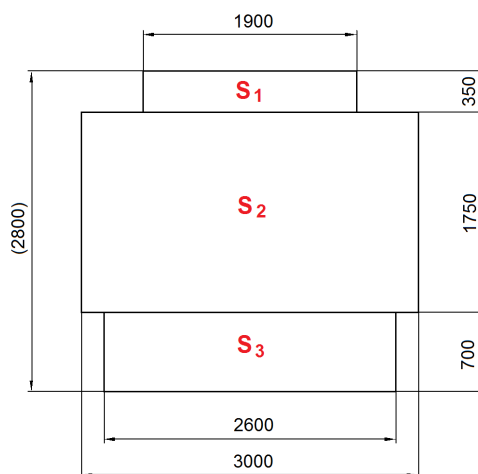
$$L_{VV} = \frac{F_{V20} \cdot L_{FV20} + F_{V30} \cdot L_{FV30} + F_{V40} \cdot L_{FV40} + F_{V50} \cdot L_{FV50} + F_{V60} \cdot L_{FV60} + F_{V70} \cdot L_{FV70} + F_{V80} \cdot L_{FV80}}{F_{VV}}$$

$$L_{VV} = \frac{6138 \cdot 8,75 + 4493 \cdot 23,3 + 4682 \cdot 34,9 + 4757 \cdot 46,5 + 4762 \cdot 58,1 + 2479 \cdot 67 + 3570 \cdot 74,3}{308821} \quad (5.10)$$

$$L_{VV} = 40,51m$$

5.3.2 Působení větru na strojovnu výložníku

Směr působení větru je brán na zadní část strojovny, rozměry strojovny ze zadního pohledu jsou na obr. 5.5.



Obr. 5.5 – Rozměry zadní části strojovny výložníku.

Vítr působící na strojovnu:

- vítr do výšky : 80 metrů
- rychlost větru : 18,3 m/s
- tlak větru : 210 N/m²

Návětrná plocha strojovny:

$$S_s = S_1 + S_2 + S_3 = 1,9 \cdot 0,35 + 2,6 \cdot 1,75 + 2,6 \cdot 0,7 = 7,74m^2 \quad (5.11)$$

Velikost síly F_{SV} :

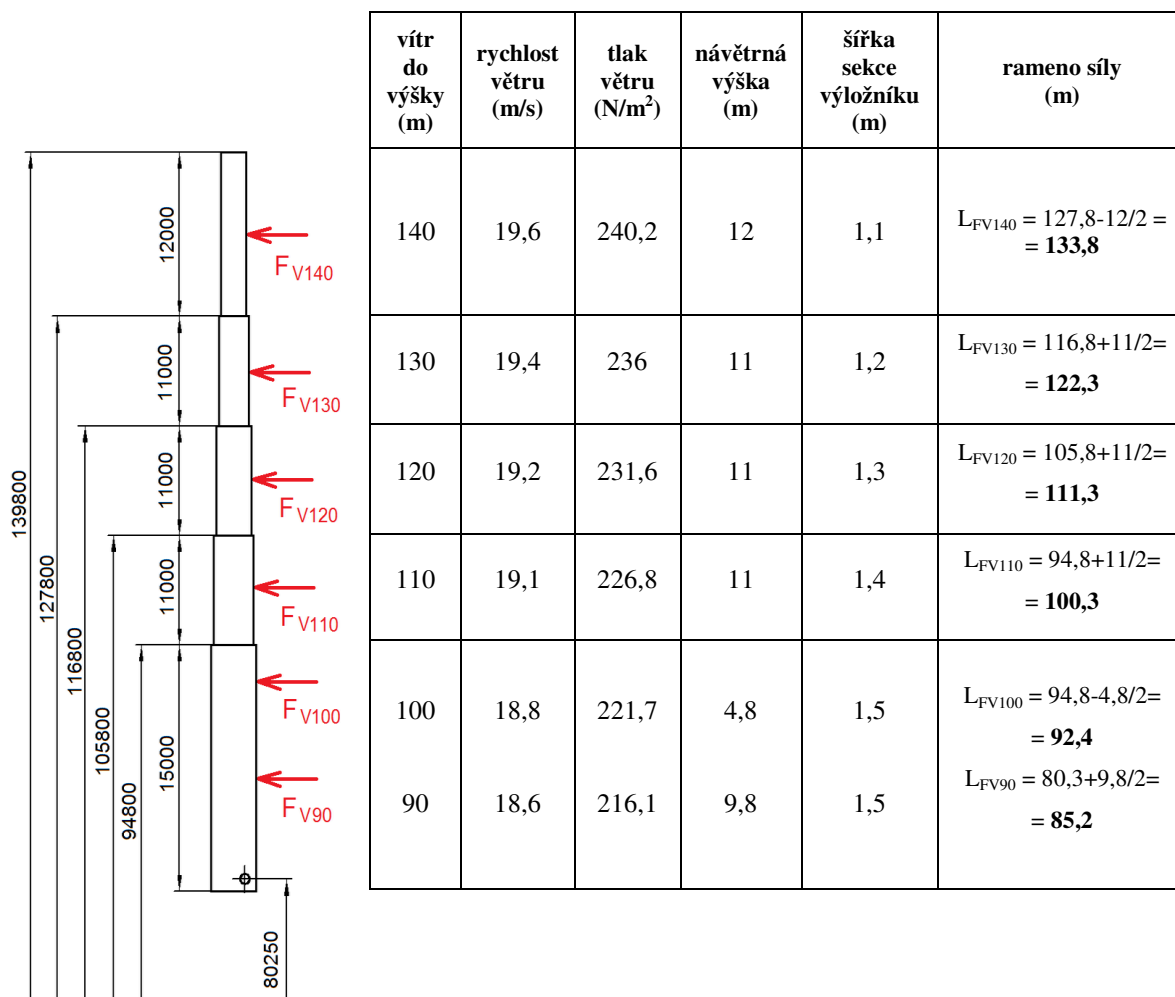
$$F_{VS} = S_S \cdot q_{V80} = 7,74 \cdot 210 = 1625,4N \quad (5.12)$$

Rameno síly F_{SV} :

$$L_{VS} = 78500 + \frac{2800}{2} = 79900mm = 79,9m \quad (5.13)$$

5.3.3 Působení větru na rameno výložníku

Vítr je počítán na každou z pěti sekcí zvlášť, pouze nejdelší sekce je rozdělena na dvě části. Ramena sil jsou umístěna uprostřed každé sekce, až na nejdelší část, kde jsou síly umístěny uprostřed počítané plochy. Schéma sil od větru působících na rameno jsou na obr. 5.6.



Obr. 5.6 – Schéma zatížení ramena větrem. Zobrazeny jsou dílčí síly, délky vysunutí jednotlivých sekcí a tabulka hodnot větru.

Výpočet dílčích sil od působení větru:

$$F_{V90} = q_{V90} \cdot S_{V90} = 216,1 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 3176,7N \quad (5.14)$$

$$F_{V100} = q_{V100} \cdot S_{V100} = 221,7 \cdot 4,8 \cdot 1,5 = 1596,2N \quad (5.15)$$

$$F_{V110} = q_{V110} \cdot S_{V110} = 226,8 \cdot 11 \cdot 1,4 = 3492,7N \quad (5.16)$$

$$F_{V120} = q_{V120} \cdot S_{V120} = 231,6 \cdot 11 \cdot 1,3 = 3311,9N \quad (5.17)$$

$$F_{V130} = q_{V130} \cdot S_{V130} = 236 \cdot 11 \cdot 1,2 = 3115,2N \quad (5.18)$$

$$F_{V140} = q_{V140} \cdot S_{V140} = 240,2 \cdot 12 \cdot 1,1 = 3170,6N \quad (5.19)$$

Celková síla na rameno od působení větru:

$$\begin{aligned} F_{VRmax} &= F_{V90} + F_{V100} + F_{V110} + F_{V120} + F_{V130} + F_{V140} = \\ &= 3176,7 + 1596,2 + 3492,7 + 3311,9 + 3115,2 + 3170,6 = 17863,3N \end{aligned} \quad (5.20)$$

Adekvátní rameno síly F_{VR} :

$$\begin{aligned} \sum M_{VR} &= 0 \\ F_{V90} \cdot L_{FV90} + F_{V100} \cdot L_{FV100} + F_{V110} \cdot L_{FV110} + F_{V120} \cdot L_{FV120} + F_{V130} \cdot L_{FV130} + F_{V140} \cdot L_{FV140} &= F_{VRmax} \cdot L_{VR} \\ L_{VRmax} &= \frac{F_{V90} \cdot L_{FV90} + F_{V100} \cdot L_{FV100} + F_{V110} \cdot L_{FV110} + F_{V120} \cdot L_{FV120} + F_{V130} \cdot L_{FV130} + F_{V140} \cdot L_{FV140}}{F_{VRmax}} \\ L_{VRmax} &= \frac{3177 \cdot 85,2 + 1596 \cdot 92,4 + 3493 \cdot 100,3 + 3313 \cdot 111,3 + 3115 \cdot 122,3 + 3171 \cdot 133,8}{17863,3} \\ L_{VRmax} &= 108,73m \end{aligned} \quad (5.21)$$

Tato síla platí pouze pro svisle vztyčené a plně vysunutě rameno, pokud se rameno skloní či zkrátí, zmenší se i jeho návětrná plocha o výšce L_{NR} a tedy i síla od větru. Je tedy potřeba vypočítat sílu větru pro každou polohu ramena výložníku (pro sklon i vysunutí). Schéma výpočtu návětrné plochy skloněného ramena je na obr. 5.3.

Příklad výpočtu L_{NR} pro $L_V = 3000$ mm a $L_R = 16\,020$ mm:

$$L_{NR} = \sqrt{L_R^2 - (L_V + L_1)^2} = \sqrt{16020^2 - (3000 + 2300)^2} = 15118mm = 15,12m \quad (5.22)$$

Síla na rameno F_{VR} je přímo úměrná délce návětrné plochy ramena, pro rameno v pozici $L_V = 3000$ mm a $L_R = 16\,020$ mm tedy bude F_{VR} rovno:

$$F_{VR} = F_{VRmax} \cdot \frac{L_{NR}}{L_{Rmax}} = 17863,3 \cdot \frac{15,12}{60} = 4501,6N \quad (5.23)$$

Se stejnou úměrností se mění i rameno působení síly F_{VR} . Určení tohoto ramena:

$$L_{VR} = (L_{VR\max} - 80,25) \cdot \frac{L_{NR}}{L_{R\max}} + 80,25 = (108,73 - 80,25) \cdot \frac{15,12}{60} + 80,25 = 87,43m \quad (5.24)$$

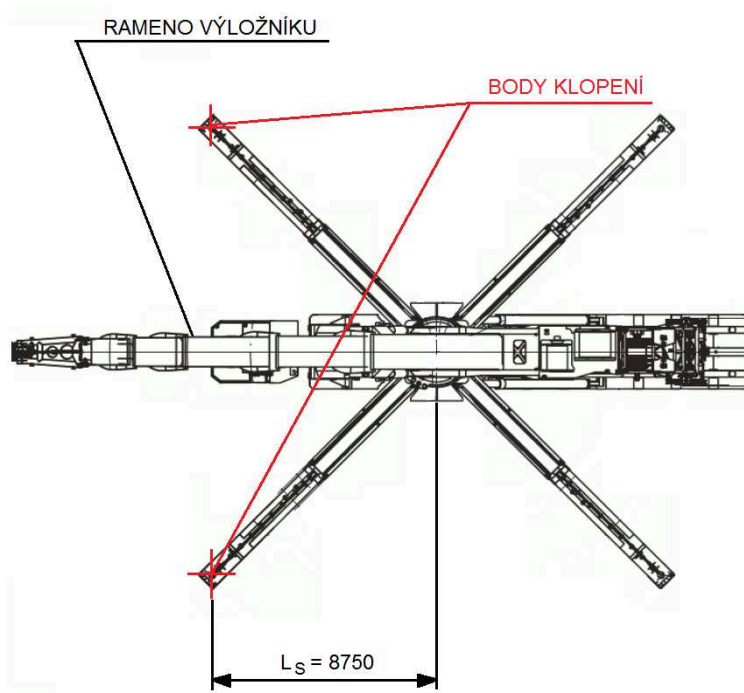
Výsledky všech hodnot F_{VR} a L_{VR} pro všechny polohy ramena výložníku jsou v příloze B2.

6 STABILITA JEŘÁBU

Stabilita jeřábu vychází ze základní podmínky, že součet stabilizačních momentů od hmotnosti samotného jeřábu (a případného závaží) musí být větší, než součet destabilizačních momentů od všech vnějších vlivů. Stabilita se určuje pro nejnevýhodnější pozici jeřábu, tedy v pozici kdy je výložník natočen přesně mezi dvě podpěry (viz. obr 6.1) a podpěry tedy mají nejmenší efektivní délku. Vzdálenost bodu, kolem kterého je jeřáb klopen, od osy věže je 8,75m v původní verzi jeřábu. Vlivem změny konstrukce jeřábu může dojít ke změně hmotnosti jeřábu, a tedy ke změně stabilizačního momentu, pokud by nevyšla kontrola stability pro takové řešení, musely by se prodloužit podpěry.

Předpoklad: vlivem zatížení a pružnou deformací se věž jeřábu a výložník nakloní ve směru vyložení břemene. Tato povolená deformace jeřábu není normalizovaná, proto budu počítat s odhadovanou deformací a následným posunutím zvedaného břemene vůči bodům klopení o 0,5 metru ve směru vyložení zvedaného břemene. Tato deformace posílí destabilizační účinky od hmotnosti břemene a od hmotnosti ramena výložníku, budu proto s tímto počítat a účinky těchto dvou vlivů posunu o 0,5 metru ve směru vyložení.

Předpoklad 2: jeřáb musí stát na rovině, aby platily stabilizační podmínky a výpočty. Prakticky může jeřáb stát na lehké šikmině, neboť za pomoci hydraulických stojek v podpěrách je možnost jeřáb vyrovnat.



Obr. 6.1 – Schéma polohy jeřábu při nevýhodné pozici pro stabilitu a vzdálenost bodu klopení od osy věže.

Mezi stabilizační prvky patří:

- **Hmotnost věže**
- **Hmotnost podpěr, táhel a ramen**, tyto komponenty jsou rovnoměrně umístěny okolo věže, jejich těžiště se tedy nachází v ose věže, proto i jejich stabilizační síla působí v ose věže.
- **Hmotnost strojovny výložníku**. Vzdálenost těžiště strojovny od osy věže je $L_{TS} = 1,4\text{m}$.
- **Hmotnost podvalníku věže**. Tento podvalník je i po zkompletování jeřábu součástí věže. Těžiště podvalníku je v ose věže, hmotnost podvalníku tedy působí v ose věže.
- **Hmotnost ramena výložníku**, ale pouze v poloze, kdy je těžiště ramena mezi bodem klopení a osou věže.

Mezi destabilizační prvky patří:

- **Hmotnost břemene**, ale pouze v poloze, kdy je vzdálenost vyložení za bodem klopení.
- **Hmotnost ramena výložníku**, ale pouze v poloze, kdy je těžiště ramena za bodem klopení.
- **Všechny síly od působení větru**.

Základní podmínka stability jeřábu:

$$\sum M_S \geq k_S \cdot \sum M_K \quad (6.1)$$

Stabilitu jeřábu je potřeba zkontrolovat i podle normy ČSN EN 4304 [4], norma uvádí tyto čtyři podmínky, pro které je potřeba kontrolovat stabilitu jeřábu:

1. **Základní stabilita** – bez účinku větru, ale hmotnost břemene je vynásobena koeficientem 1,5.
2. **Dynamická stabilita** – s účinkem provozního větru a hmotností břemene vynásobeném koeficientem 1,3. Započítány jsou i setrvačné síly jeřábu, pokud jsou zadány výrobcem, v našem případě zadány nejsou.
3. **Extrémní zatížení větrem** – bez účinku břemene, ale s účinkem větru, který je povolen při nečinnosti jeřábu a bez břemene. Tento účinek větru je vynásoben

koeficientem 1,2. Jeřáb nabízí rychlé zasunutí věže i výložníku, a tím razantně snížit návětrnou plochu, proto pokud rychlost větru přesáhne povolenou mez, nesmí se s jeřábem pracovat a proto může být snížen. Poté je schopen čelit velmi silným větrům. Proto se touto podmínkou nebudu ve své práci zabývat.

4. **Náhlé uvolnění břemene** – při uvolnění břemene norma počítá se záporným účinkem hmotnosti břemene vynásobeném koeficientem 0,2. Tento případ je důležitý spíše pro jeřáby s velkým množstvím protizávaží, kdy v klidové poloze není jeřáb klopen ve směru vyložení, ale proti směru vyložení. Toto není můj případ, proto tuto část nebudu kontrolovat (vyšla by vždy).

6.1 Výpočet dílčích destabilizačních momentů

6.1.1 Destabilizační moment od hmotnosti břemene

Hmotnosti zdvihaných břemen vychází z Tabulky 1 (kapitola 5.1). Destabilizační moment od břemene závisí na hmotnosti břemene a vzdálenosti vyložení.

Výpočet destabilizačního momentu od břemene pro délku vyložení $L_V = 3\text{m}$ a hmotnost břemene $m_B = 139\text{t}$:

$$M_{KN} = m_B \cdot g \cdot (L_V - L_S + L_D) = 139 \cdot 9,81 \cdot (3 - 8,75 + 0,5) = -7158,8\text{kNm} \quad (6.2)$$

Protože se v tomto případě nachází tíha břemene mezi bodem klopení a osou věže, je její účinek stabilizační, proto je výsledek záporný.

Destabilizační momenty je potřeba určit pro všechny polohy výložníku a pro všechny hodnoty povolených hmotností břemen z tabulky 2: nosnost jeřábu z kapitoly 5.1, tabulka výsledků pro tyto hodnoty je v příloze B3.

Maximální destabilizační moment od hmotnosti břemene je v poloze vyložení $L_V = 32\text{ metrů}$ a hmotnost břemene $m_B = 26\text{ tun}$, $M_{KN\max} = 6057,7\text{ kNm}$.

6.1.2 Destabilizační moment od hmotnosti ramena výložníku

Klopení od hmotnosti ramena výložníku vychází z jeho hmotnosti, která působí v jeho těžišti, a vzdálenosti tohoto těžiště od bodu klopení. Vzdálenosti těžišť od osy věže pro všechny polohy ramena jsou brány z přílohy B1.

Výpočet destabilizačního momentu od hmotnosti ramene výložníku pro délku vyložení $L_V = 3\text{m}$, z toho vyplývá vzdálenost $L_{TR2} = 0,191\text{m}$:

$$M_{KR} = m_R \cdot g \cdot L_{KR} = m_R \cdot g \cdot (L_{TR2} - L_S + L_D) = 41,9 \cdot 9,81 \cdot (0,191 - 8,75 + 0,5) = -3312,6\text{kNm} \quad (6.3)$$

Protože se v tomto případě nachází těžiště ramena mezi bodem klopení a osou věže, je jeho účinek stabilizační, proto je výsledek záporný.

Destabilizační momenty je potřeba určit pro všechny polohy výložníku z tabulky 2: nosnost jeřábu z kapitoly 5.1, tabulka výsledků pro tyto hodnoty je v příloze B4.

Maximální destabilizační moment od hmotnosti ramena výložníku je v poloze vyložení $L_V = 56$ metrů, $M_{KR\max} = 6527\text{ kNm}$.

6.1.3 Destabilizační moment od větru působícího na věž

Působení větru na věž je popsáno v kapitole 5.3.1. Výpočet destabilizačního momentu od působení větru na věž:

$$M_{KV} = F_{VV} \cdot L_{VV} = 30882,1 \cdot 40,51 = 1251033\text{Nm} = 1251\text{kNm} \quad (6.4)$$

6.1.4 Destabilizační moment od větru působícího na strojovnu výložníku

Působení větru na strojovnu výložníku je popsáno v kapitole 5.3.2. Výpočet destabilizačního momentu od působení větru na strojovnu:

$$M_{KS} = F_{VS} \cdot L_{VS} = 1625,4 \cdot 79,9 = 129870\text{Nm} = 129,9\text{kNm} \quad (6.5)$$

6.1.5 Destabilizační moment od větru působícího na rameno výložníku

Působení větru na rameno výložníku je popsáno v kapitole 5.3.3. U výložníku je potřeba vypočítat destabilizační momenty pro všechny jeho polohy dané tabulkou 2: nosnost jeřábu (kapitola 5.1). Příklad výpočtu pro délku vyložení $L_V = 3\text{m}$, vysunutí výložníku $L_R = 16,02\text{m}$, návětrná délka výložníku je tedy $L_{NR} = 15,12\text{m}$ a rameno síly od větru $L_{VR} = 87,43\text{m}$:

$$M_{KRV} = F_{VR} \cdot L_{VR} = 4501,6 \cdot 87,43 = 393575\text{Nm} = 393,6\text{kNm} \quad (6.6)$$

Tabulka výsledků pro všechny polohy výložníku je v příloze B5.

Maximální destabilizační moment od působení větru na rameno výložníku je v poloze vyložení $L_V = 11\text{m}$ a vysunutí ramena na $L_R = 60\text{m}$, $M_{KRV\max} = 1881,6\text{ kNm}$.

6.2 Výsledný destabilizační moment – určení kritického místa

K určení maximálního destabilizačního momentu je potřeba vypočítat celkové destabilizační momenty pro všechny polohy výložníku a z nich určit maximum. Nelze sečíst maximální dílčí destabilizační momenty, neboť jsou pro různé polohy výložníku. Tabulka celkových destabilizačních momentů pro všechny polohy výložníku je v příloze B6.

Z přílohy B6 je určen maximální destabilizační moment $M_{K\max} = 12725,2\text{ kNm}$ pro rameno v poloze vyložení $L_V = 56\text{m}$ a vysunutí ramene $L_R = 60\text{m}$.

Pro určení stability jeřábu je potřeba upravit celkové destabilizační momenty podle normy ČSN 4304 (kapitola 6).

6.2.1 Celkový destabilizační moment základní stability

Zátěž je vynásobena koeficientem 1,5 a není započítán účinek větru. Příklad výpočtu destabilizačního momentu základní stability pro $L_V = 56\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$:

$$M_{KZS} = 1,5 \cdot M_{KN} + M_{KR} = 1,5 \cdot 4450,1 + 6527 = 13202,2\text{ kNm} \quad (6.7)$$

Hodnoty M_{KN} a M_{KR} jsou brány pro danou polohu výložníku z příloh B3 a B4, hodnoty momentů pro všechny polohy ramena výložníku jsou v příloze B7.

Maximální destabilizační moment ze všech poloh výložníku je právě tento, tedy v poloze ramena $L_V = 56\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$, $M_{KZS\max} = 13202,2\text{ kNm}$

6.2.2 Celkový destabilizační moment dynamické stability

Zátěž je vynásobena koeficientem 1,3 a je započítán účinek větru. Příklad výpočtu destabilizačního momentu dynamické stability pro $L_V = 56\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$:

$$\begin{aligned} M_{KDS} &= 1,3 \cdot M_{KN} + M_{KR} + M_{VS} + M_{VV} + M_{VR} \\ M_{KDS} &= 1,3 \cdot 4450,1 + 6527 + 129,9 + 1251 + 367,2 = 14060,2\text{ kNm} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Hodnoty M_{KN} a M_{KR} jsou brány pro danou polohu výložníku z příloh B3 a B4, hodnoty momentů pro všechny polohy ramena výložníku jsou v příloze B8.

Maximální destabilizační moment ze všech poloh výložníku je v poloze ramena $L_V = 52\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$, **$M_{KDSmax} = 14113,5 \text{ kNm}$**

7 NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - ODSTRANĚNÍ VÝZTUŽÍ

Montáž výztuží a pomocných ramen je časově náročná, pokud by se zesílila věž, bylo by teoreticky možné výztuhy odstranit. Současná věž má průměr základní sekce 2,15 metru, teoretický maximální průměr této sekce je 3 metry, více nemůže být z důvodu převozu, podvalník s věží by byl příliš široký. Praktické maximum je ovšem 2,5 metru, ke věži je totiž potřeba z boku přidělat hydraulické válce. Větší průměr věže by si vyžádal předělání systému zdvihání věže do svislé polohy.

Došlo tedy ke zvětšení **průměru věže z 2,15m na 2,5m** při zachování síly stěny. **Průměr** byl tedy **zvětšen o 16,3%**, **nosná plocha** průřezu (a tedy i hmotnost) se zvětšila o **16,8%** a **kvadratický moment** plochy průřezu věže se zvětšil o **57,7%**.

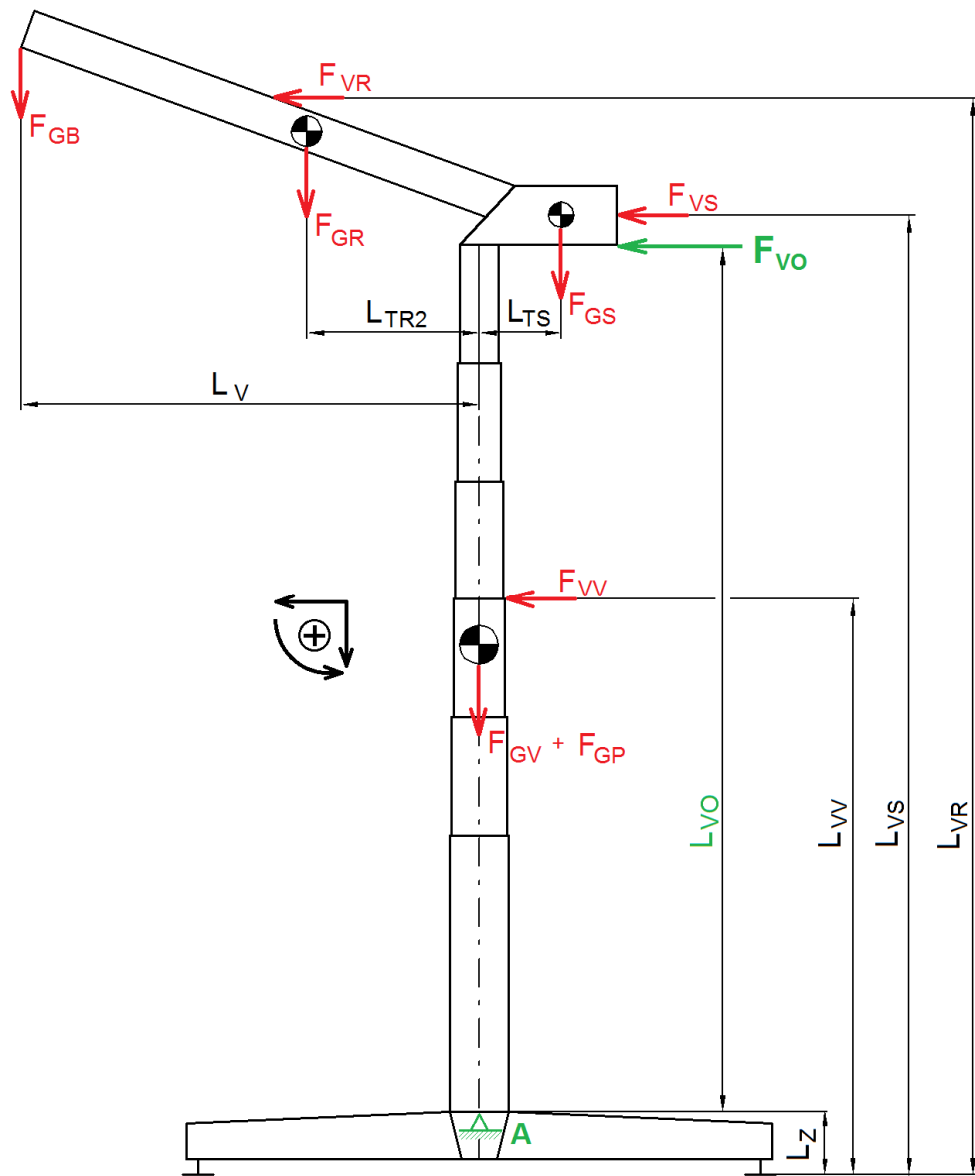
7.1 Namáhání věže

Věž je bez výztuží namáhána na ohyb, vetknutí věže je v základně, ta je pak spojena s podpěrami. Ohybový moment je roven součtu všech dílčích momentů od větru, zvedaného břemene a hmotnosti částí jeřábu. Výsledný ohybový moment není stejný jako moment u stability (kapitola 6.2), ten je totiž vztažený ke klopnému bodu na podpoře, ohybový moment působící na věž je potřeba vztáhnout k ose věže. Pro jednodušší výpočet a MKP řešení je potřeba nahradit účinek všech ohybových momentů jedinou silou se stejným ohybovým účinkem, která působí na horním konci věže, viz obr. 7.1.

7.2 Materiál věže a dalších částí jeřábu

Materiály původního jeřábu jsou S235J a pro více namáhané části S355J. Oba tyto materiály platí pouze pro svařované součásti rozměry velkých rozměrů, pro menší součásti se používají další materiály. K těmto materiálům lze z českých norem vybrat ekvivalentní materiály 11 343 a 11 523, více namáhané díly (jakým je i věž) jsou tedy z materiálu 11 523. Tento materiál má vlastnosti:

Pevnost v tahu:	min. 510 MPa
Mez v kluzu:	min. 355 MPa
Modul pružnosti v tahu:	$E = 210\,000\text{ MPa}$



Obr. 7.1 – Schéma sil působících na věž a nahrazení jednou silou.

Je tedy potřeba přepočítat ohybové momenty od tíhy ramena výložníku a od zvedaného břemene k ose věže, ostatní síly potom brát s ramenem kratším o $L_Z = 2000\text{mm}$. $L_{TS} = 1400\text{mm}$. Výsledný ohybový moment působící na věž jeřábu pro výložník v pozici $L_V = 56\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$:

$$M_A = F_{VV} \cdot (L_{VV} - L_Z) + F_{VS} \cdot (L_{VS} - L_Z) + F_{VR} \cdot (L_{VR} - L_Z) + F_{GR} \cdot L_{TR2} + F_{GB} \cdot L_V - F_{GS} \cdot L_{TS}$$

$$M_A = 30882 \cdot (40,5 - 2) + 1625 \cdot (80 - 2) + 4222 \cdot (87 - 2) + 42 \cdot 9,8 \cdot 24 + 9,5 \cdot 9,8 \cdot 56 - 13,3 \cdot 9,8 \cdot 1,4 \quad (7.1)$$

$$M_A = 16629 \text{ kNm}$$

Tabulka momentů pro všechny polohy ramena výložníku jsou v příloze B9. Maximální ohybový moment $M_{A\max} = 16\,706 \text{ kNm}$ při poloze výložníku $L_V = 52\text{m}$ a $L_R = 60\text{m}$.

Výpočet nahrazující síly F_{VO} :

$$M_{Amax} = M_{VO}$$

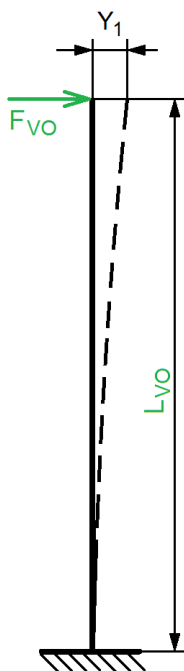
$$M_{Amax} = F_{VO} \cdot L_{VO} \quad (7.2)$$

$$F_{VO} = \frac{M_{Amax}}{L_{VO}} = \frac{16629}{76,5} = 217,4 kN$$

7.3 Deformační kontrola

Věž je namáhána ohybovým momentem, bude se tedy deformovat ohybem ve směru vyložení břemene.

Předpoklad: pro základní výpočet deformace věže od ohybu budu uvažovat věž jako válec neměnného průměru a neměnné síly stěny, model zatížení dle schématu obr. 7.2. Reálná věž má zmenšující se průměr sekcí s rostoucí výškou od upnutí, stejně tak síla stěny vyšších sekcí je nižší, reálná deformace tedy bude vyšší.



Obr. 7.2 – Věž je brána jako dlouhý vetknutý prut zatěžovaný na konci silou.

Výpočet kvadratického momentu průřezu. Průměr věže je 2,5m, síla stěny 16mm, vnitřní průměr věže je tedy 2,468m:

$$I_{2,5} = \frac{\pi \cdot (D_{2,5}^4 - D_{2,468}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (2500^4 - 2468^4)}{64} = 9,631 \cdot 10^{10} mm^4 \quad (7.3)$$

Výpočet průhybu věže Y_1 :

$$Y_1 = \frac{M_s}{E \cdot I} = \frac{F_{vo} \cdot L_{vo}^3}{3 \cdot E \cdot I_{2,5}} = \frac{217400 \cdot 76500^3}{3 \cdot 210000 \cdot 9,631 \cdot 10^{10}} = 1604,1mm \quad (7.4)$$

Prohnutí věže je tedy 1,6m. Pokud by věž měla maximální možný průměr, tedy 3m, stejnou sílu stěny 16mm (vnitřní průměr 2,968m) byl by průhyb:

$$I_3 = \frac{\pi \cdot (D_3^4 - D_{2,968}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (3000^4 - 2968^4)}{64} = 1,67 \cdot 10^{11} mm^4 \quad (7.5)$$

$$Y_2 = \frac{M_s}{E \cdot I} = \frac{F_{vo} \cdot L_{vo}^3}{3 \cdot E \cdot I_3} = \frac{217400 \cdot 76500^3}{3 \cdot 210000 \cdot 1,67 \cdot 10^{11}} = 925,1mm \quad (7.6)$$

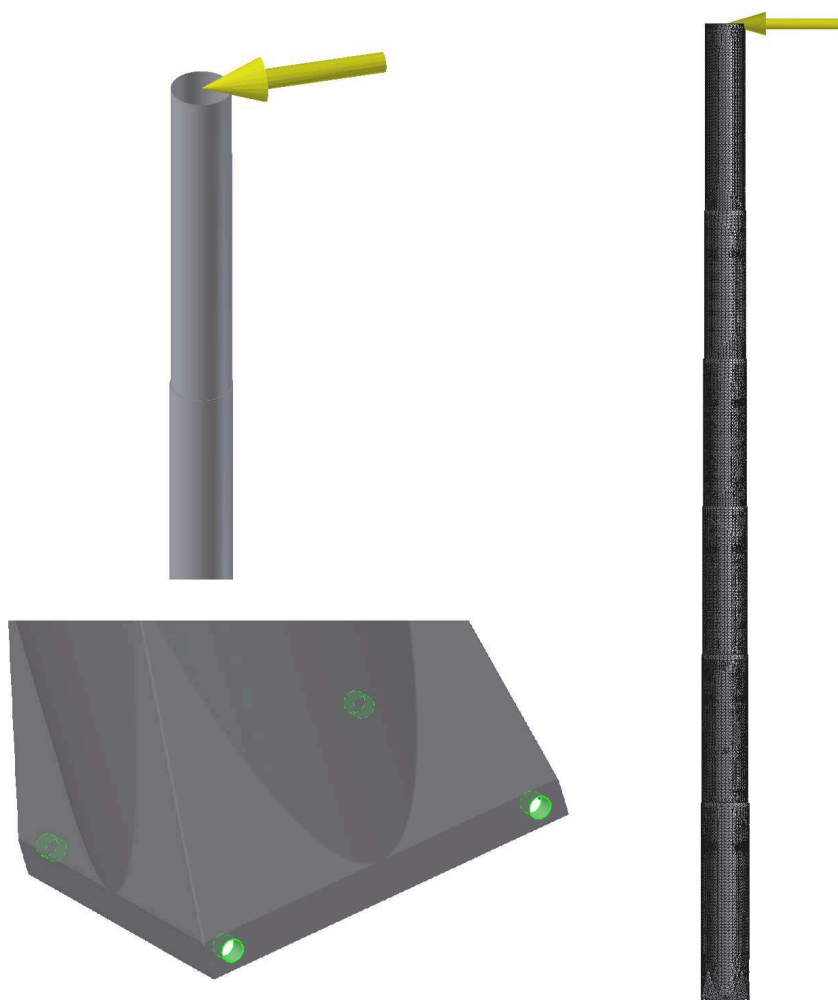
I při maximálním možném průměru se věž prohne o 925mm, a to při zjednodušeném výpočtu, v reálu bude prohnutí větší, pro zjištění reálné hodnoty je potřeba použít výpočetní program s využitím metody konečných prvků (MKP).

MKP vstupní parametry zatížení věže o průměru 3m:

Věž byla detailně vymodelována v programu Inventor. Věž je sestavena z jednotlivých sekcí do sestavy, která byla zatížena silou 217,4kN. Montážní otvory ve spodní části věže byly uchyceny pevnou vazbou, simulují uchycení věže k základně, viz obr. 7.3. Základní sekce má průměr 3 metry a je plechu tloušťky 16mm, další sekce mají tloušťky 15mm a 14mm pro ušetření hmotnosti. Přesto je váha věže bez vnitřních komponent 108 tun.

MKP výsledky deformace věže o průměru 3m:

Výsledky jsou na obr. 7.4. Věž se ohnula o 1140mm, předpoklad vyšší reálné deformace byl tedy správný. Podobně vyšší deformaci by měla i věž o průměru 2,5m. Přestože je deformace vysoká, maximální napětí u paty věže nepřekročí 200MPa (maximum okolo 179MPa), věž by tedy pevnostně mohla vydržet, ovšem pouze ze statického hlediska, dynamické namáhání, které by přinesla tak značná deformace (celá věž by kývavě oscilovala) by nejspíš překročilo povolenou mez. Rovněž není započítána tlaková síla, věž by tedy byla namáhána ještě na vzpěr. Na obr. 7.4 jsou patrné i koncentrace napětí v určitých místech, tyto koncentrace mohou být způsobeny ostrými přechody, případně příliš hrubou sítí v daném místě, tyto výsledky proto nelze brát vážně, tyto místa ale nebyly předmětem zkoumání, proto se jimi nebudu dále zabývat.

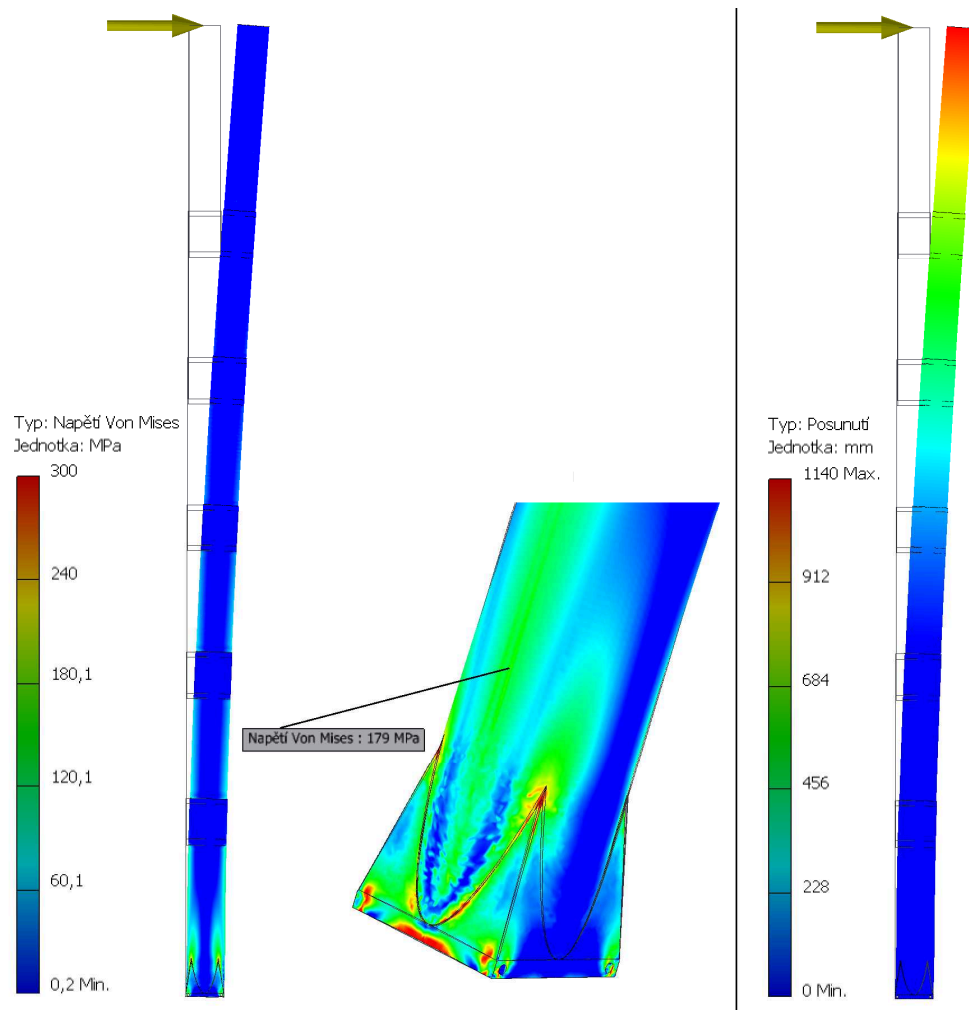


Obr. 7.3 – Detail umístění zatěžující síly, pevné vazby v otvorech paty věže (zelené plochy) a pohled na síť prvků.

Shrnutí navrhované úpravy:

Úprava nabízela zajímavou možnost odstranit výztuže a tím razantně zkrátit montážní čas. I po zvětšení průměru věže z 2,15m na 3m ale byla deformace samotné věže při zátěži 1140mm, což je pro přesnou práci jeřábu nepřijatelná hodnota. Navíc nejde o konečnou hodnotu, protože je k této deformaci potřeba přičíst deformaci základny a podpěr, kdy dojde k naklonění věže a i tato deformace vycházela podle MKP velmi značná. Výsledné posunutí věže se tak blížilo ke 2500mm. Navíc jde o věž průměru 3m, která hraničí s možností převozu a navíc by byla potřeba kompletně předělat systém zvedání věže do svislé polohy. Rovněž hmotnost věže je značně vyšší, převážet by se tedy s velkou pravděpodobností musela rozdělaná na dvě části, jejich montáž na místě by pak zabrala čas, je tedy otázka jestli by vůbec došlo k nějaké časové úspoře tohoto řešení.

Z důvodu nepřijatelné pružné deformace jeřábu a posunutí věže hodnotím tuto úpravu jako **nepoužitelnou**. Z tohoto důvodu nejsou rozpracovány pevnostní analýzy dalších částí jeřábu.



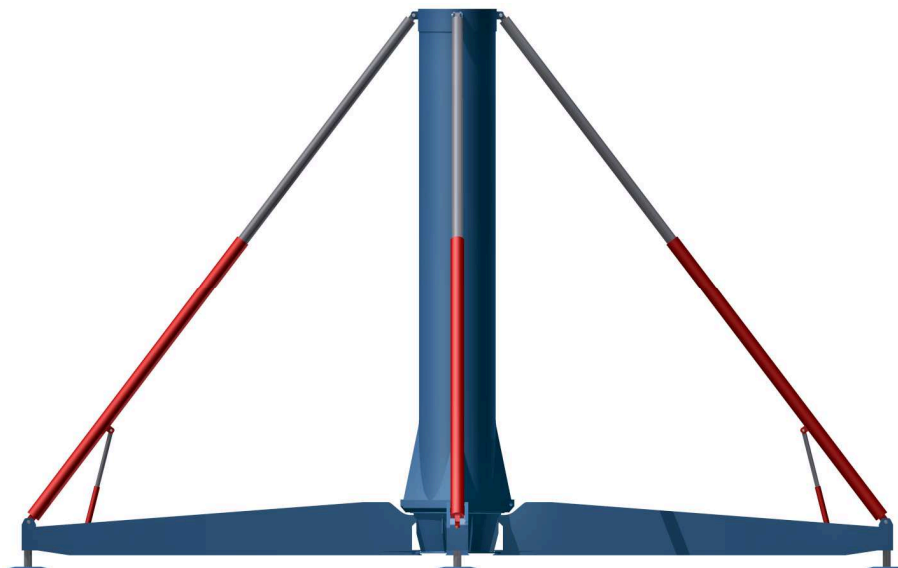
Obr. 7.4 – Výsledky MKP. Zobrazen průběh napětí ve věži, detail paty věže s vyznačením maximálního reálného napětí. Také je zobrazen průběh deformace a posunutí horní části věže.

8 NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - ZKRÁCENÍ VÝZTUŽÍ

Z předchozí kapitoly (7.2) a konceptu odstranění výztuh je zřejmé, že největším problémem je pružná deformace věže, základny a podpěr, kdy výsledné posunutí horní části věže je značné a brání v realizaci tohoto řešení. Největší deformaci má věž ve spodní části, tedy v místě upnutí k základně, rovněž základna a podpěry jsou zdrojem značného vychýlení věže, neboť i malá deformace se projeví na vychýlení věže. Nabízí se tedy možnost posílit oblast základny, podpěr a první sekce věže.

8.1 Konceptní návrh

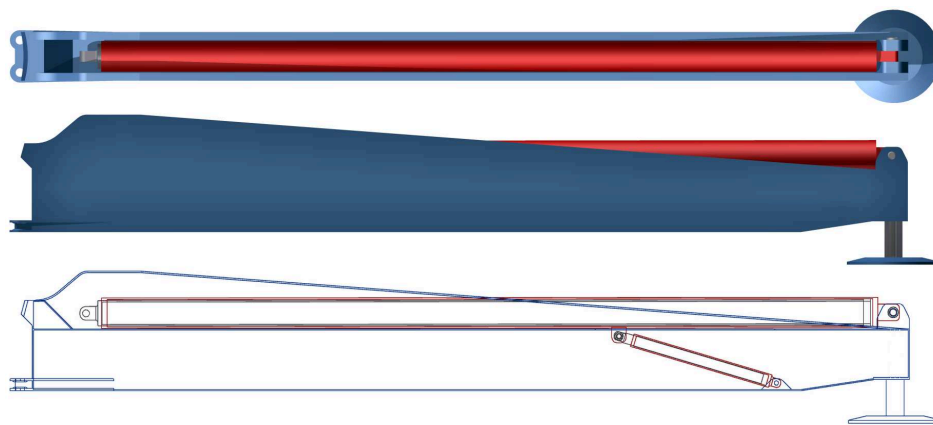
Spodní oblast jeřábu (tedy první sekce věže, základna a podpěry) je doplněna čtyřmi hydraulickými výztuhami (obr. 8.1). Tyto výztuhy jsou doplněny druhým hydraulickým válcem, který je zdvihá do pracovní polohy.



Obr. 8.1 – Spodní část jeřábu zesílená čtyřmi výztuhami.

Přeprava výztuží:

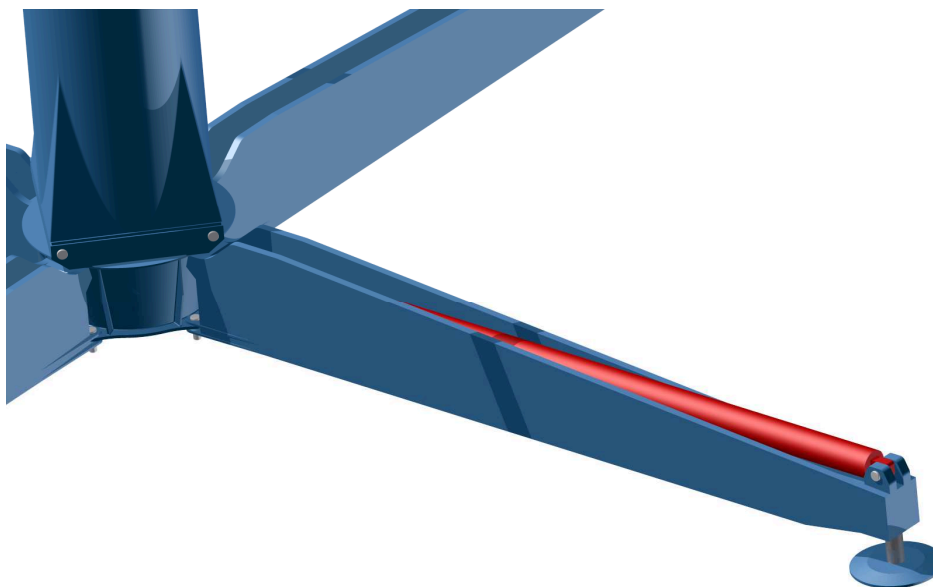
Výztuhy jsou kloubem trvale spojeny s podpěrami, při přepravě jsou tedy uloženy v podpěrách. Na obr. 8.2 je vidět uložení výztuže v podpěře, stejně jako pomocný hydraulický válec.



Obr. 8.2 – Uložení hydraulické výztuže v podpěře.

Montáž výztuží:

1. K základně věže se přimontují podpěry běžným způsobem. Poté se přimontuje výložník a celá věž se zdvihne do svislé polohy (obr. 8.3).
2. Hydraulická výztuž se pomocným hydraulickým válcem zdvihne do pracovní polohy (obr. 8.4). Tento proces se děje souběžně s procesem vysunování věže, nedochází tedy k časové ztrátě.
3. Po zdvihnutí podpěry do pracovní polohy dojde k jejímu vysunutí a spojení s věží (obr. 8.1). Spodní část jeřábu je tedy připravena k práci.



Obr. 8.3 – Podpěra s výztuží přimontovaná k základně jeřábu.



Obr. 8.4 – Zdvihnutí výztuže pomocným válcem do pracovní polohy.

Konstrukce výztuží:

Výztuže jsou prakticky hydraulické válce o vnějším průměru 430mm a délce 11200mm. Velký průměr válce je potřebný z důvodu namáhání výztuží na vzpěr. Váha výztuží je 4210 kg. Vzhledem k rozměrům je zřejmé, že vnitřní objem válce je značný, a tedy bude i potřeba značného množství oleje pro vysunutí výztuží. Jedna výztuž by vyžadovala 1050 litrů oleje pro plné vysunutí. Tato konstrukce tedy není optimální, bylo by vhodné konstrukci upravit. Možná řešení jsou:

- 1. Dutý hydraulický válec** – Při použití dutého hydraulického válce by zůstal potřebný vnější průměr válce, vnitřní objem pro olej by ale klesl na zhruba 160 litrů. Zajistit toto množství oleje již je reálné.
- 2. Vnitřní hydraulický válec** – Výztuž by byla tvořena ze dvou částí. Nosný teleskopický vnější obal o potřebném průměru, a vnitřní hydraulický válec se značně menším průměrem pro výsun. Při průměru pístu válce 100mm by bylo potřebné množství oleje pro vysunutí 71 litrů.

Polohové zajištění výztuží:

Při práci se výztuže nesmí zasunovat a vysunovat, a to ani vlivem pružných deformací, neboť by docházelo ke klopení věže jeřábu. Výztuž se proto musí dostatečně pevně zajistit proti vysunování a zasunování. Nabízí se dva možné způsoby zajištění polohy:

- 1. Hydraulicky** – Použitím hydraulického zámku. Lze použít pouze u varianty velkého hydraulického válce a dutého hydraulického válce. Nevýhodou je pružnost oleje, výztuže by tedy nebyly dokonale tuhé.
- 2. Mechanicky** – Po vysunutí by se obě části výztuže zajistily čepem, který by zamezil jejich vzájemnému posunu. Toto použití je vhodné zvláště u varianty s vnitřním hydraulickým válcem. Vysunování zajišťovacího čepu by mohlo být hydraulicky, tedy bez nutnosti zásahu obsluhy. Nevýhodou je náročnost na přesné umístění otvorů čepů všech čtyř výztuží.

Výztuže se musí upnout k věži, k tomu slouží příruba na horní části první sekce věže. Upnutí je zajištěno čepem, ten může být namontován obsluhou, nebo hydraulickým výsunem. Hydraulické vysunutí je vhodnější z pohledu času, vytížení obsluhy a bezpečnosti obsluhy, neboť odpadá montáž ve výšce (výška umístění čepů je 17 metrů).

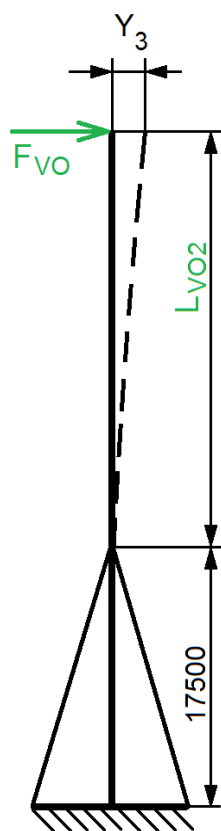
Konstrukční změny věže:

Průměr věže zvětšen z 2,15m na 2,5m. Spodní sekce mají sílu stěny 16mm, vyšší sekce mají sníženou sílu stěny až na 13mm, tato úprava zaručí stejnou hmotnost jako měla původní věž i při zvýšení průměru věže. Hmotnost věže je tedy 89 tun.

Horní část první sekce je vybavena úchyty pro výztuže, rovněž byla tato část zesílena z důvodu nutnosti přenášet síly na výztuže a tedy z důvodu větší zátěže této oblasti.

8.2 Namáhání a deformace věže

Věž je namáhána ohybem od síly F_{VO} a na vzpěr od hmotnosti břemene a komponent jeřábu. Oblast první sekce věže je posílena výztužemi a tvoří tak pevný celek, ohybem je věž namáhána až od druhé sekce nad výztužemi, schéma na obr. 8.5, rozměry sekcí věže a jejich výšky od země na obr. 5.4 v kapitole 5.3.1.



Obr. 8.5 – Schéma namáhání a ohybu věže s podpěrami.

Předpoklad: pro základní výpočet deformace věže od ohybu budu uvažovat věž jako dutý válec neměnného průměru a neměnné síly stěny. Protože je ohybem věž namáhána od druhé sekce, budu uvažovat věž o průměru této sekce, tedy 2,4m a síly stěny 16mm. Reálná věž má zmenšující se průměr sekcí s rostoucí výškou od upnutí, stejně tak síla stěny vyšších sekcí je nižší, reálná deformace tedy bude vyšší.

Výpočet kvadratického momentu průřezu. Průměr věže je 2,4m, síla stěny 16mm, vnitřní průměr věže je tedy 2,368m:

$$I_{2,4} = \frac{\pi \cdot (D_{2,4}^4 - D_{2,368}^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (2400^4 - 2368^4)}{64} = 8,5137 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \quad (8.1)$$

Výpočet průhybu věže Y_2 :

$$Y_3 = \frac{M_s}{E \cdot I} = \frac{F_{vo} \cdot L_{vo2}^3}{3 \cdot E \cdot I_{2,4}} = \frac{217400 \cdot (76500 - 17500)^3}{3 \cdot 210000 \cdot 8,5137 \cdot 10^{10}} = 832,4 \text{ mm} \quad (8.2)$$

Pro zjištění skutečné hodnoty prohnutí je potřeba použít výpočetní program s využitím metody konečných prvků (MKP).

MKP vstupní parametry zatížení věže o průměru 2,5m:

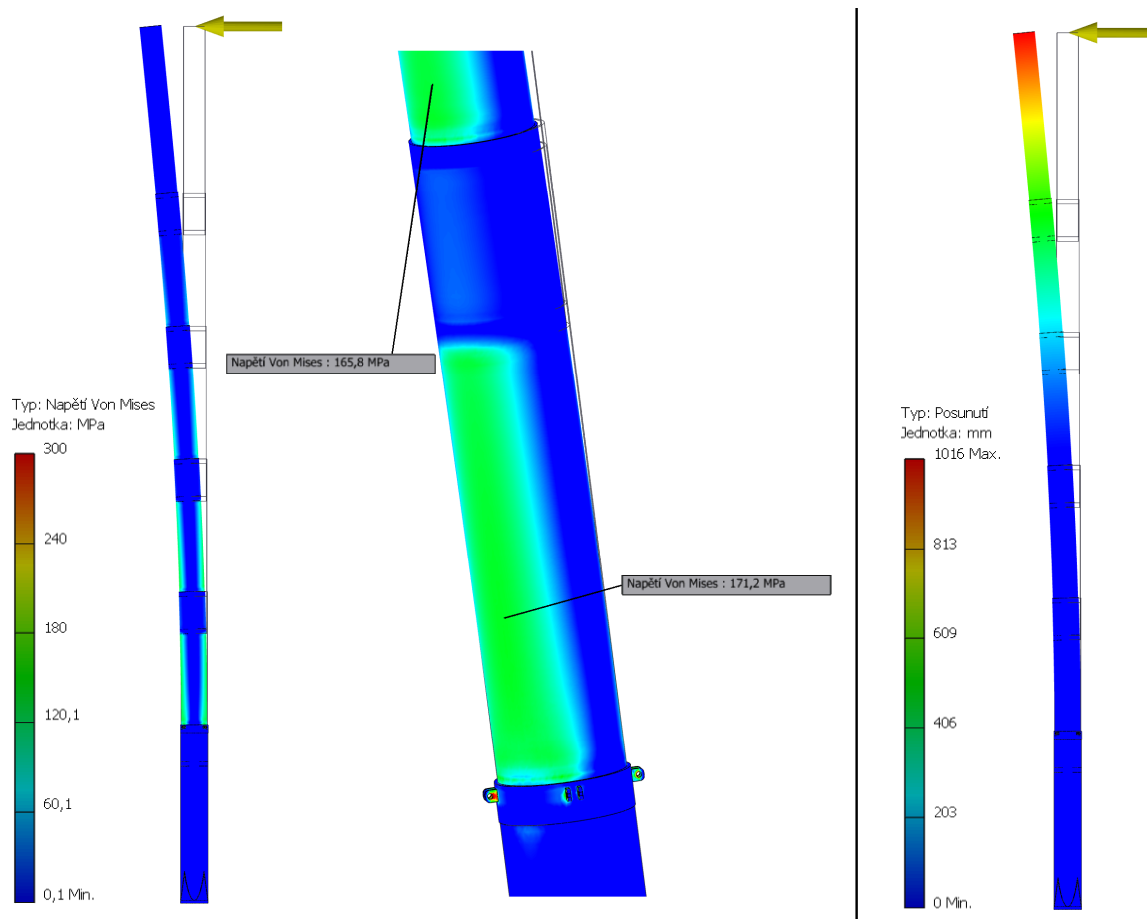
Věž byla detailně vymodelována v programu Inventor. Věž je sestavena z jednotlivých sekcí do sestavy, která byla zatížena silou 217,4kN. Montážní otvory ve spodní části věže a úchyty výztuží byly uchyceny pevnou vazbou, simulují uchycení věže k základně a výztužím, viz obr. 8.6.

MKP výsledky deformace věže o průměru 2,5m:

Výsledky jsou na obr. 8.7. Věž se ohnula o 1016mm, tato deformace je vyšší než u zjednodušeného výpočtu, odpovídá tedy realitě. Přestože je deformace vysoká, maximální napětí v druhé a třetí sekci nepřekročí 200MPa (maximum 171MPa, respektive 166MPa), věž by tedy pevnostně mohla vydržet, ovšem pouze ze statického hlediska, dynamické namáhání, které by přinesla tak značná deformace (celá věž by kývavě oscilovala) by nejspíš překročilo povolenou mez. Rovněž není započítána tlaková síla, věž by tedy byla namáhána ještě na vzpěr.



Obr. 8.6 – Pevné vazby pro MKP výpočet simulující upnutí věže (modré plochy).



Obr. 8.7 - Výsledky MKP pro věž s hydraulickými výztužemi. Zobrazen průběh napětí ve věži, detail druhé sekce věže s vyznačením maximálního napětí. Také je zobrazen průběh deformace a posunutí horní části věže.

8.3 Namáhání a deformace základny, podpěr a výztuží

Základna a podpěry již nejsou namáhány od síly, která ohýbá věž, tuto sílu zachytí výztuže. Základna a podpěry jsou tedy namáhány pouze od hmotnosti břemene a komponent jeřábu.

Výztuže jsou namáhány od síly, která namáhá věž ohybem. Namáhání samotných výztuží má charakter tahu nebo vzpěru, podle umístění výztuže.

Vlivem pružné deformace výztuží, základny a podpěr dojde k vychýlení věže ve směru vyložení břemene. Toto vychýlení se sečte s deformací samotné věže, výsledné vychýlení věže tedy bude větší než to v kapitole 7.3.2. Pro určení vychýlení věže vlivem deformace výztuží, základny a podpěr je potřeba použít výpočetní program s využitím metody konečných prvků (MKP).

MKP vstupní parametry zatížení spodní části jeřábu:

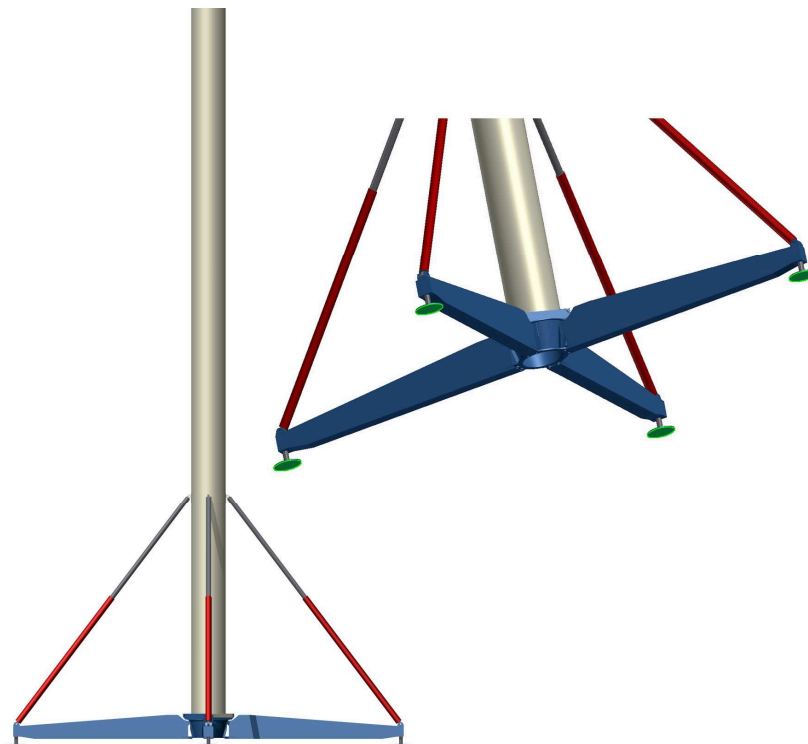
Všechny komponenty spodní části jeřábu byly detailně vymodelovány v programu Inventor. Věž je nahrazena dokonale tuhým tělesem, samotná věž se tedy nebude deformovat, což umožní zjistit posunutí věže pouze od vlivu deformace spodních částí jeřábu. Model spodní části jeřábu a věže je na obr. 8.8, stejně jako zobrazení pevných vazeb, které simulují postavení jeřábu na podloží. Soustava je zatížena silou F_{VO} která je umístěna na špici věže..

MKP výsledky deformace spodní části jeřábu:

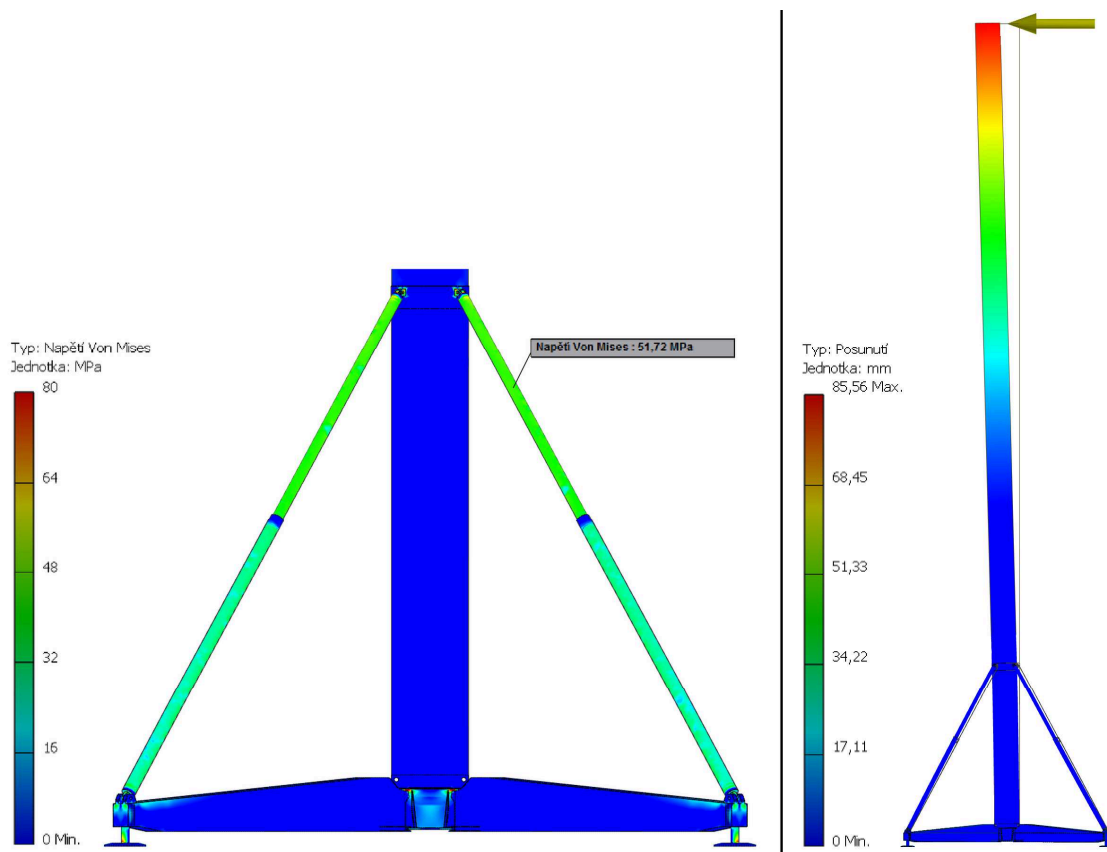
Výsledky jsou na obr. 8.9. Vychýlení věže vlivem deformace spodní části jeřábu je 85,6mm, maximální napětí ve výztužích je 52MPa. Výztuže jsou tedy pevnostně dimenzovány dostatečně, bylo by možné jejich odlehčení, úměrně by se ale snížila jejich tuhost a tím by se zvýšilo vychýlení věže. Napětí v ostatních částech jeřábu (podpěry, základna) nebylo předmětem tohoto výpočtu, proto nebyla soustava zatížena silou od hmotností břemene a jeřábu, proto ani výsledky těchto částí nejsou směrodatné. Účelem bylo pouze zjištění vychýlení věže od síly F_{VO} .

Celkové posunutí věže vlivem deformací částí jeřábu:

$$Y_{3C} = 1016 + 85,6 = 1101,6mm \quad (8.3)$$



Obr. 8.8 – Sestava pro MKP s dokonale tuhou věží. Vpravo potom zobrazeny pevné vazby (zelené plochy).



Obr. 8.9 – Výsledky MKP pro spodní část jeřábu s dokonale tuhou věží. Zobrazeno napětí ve výztužích a posunutí věže vlivem pružné deformace výztuží.

8.4 Shrnutí navrhované úpravy

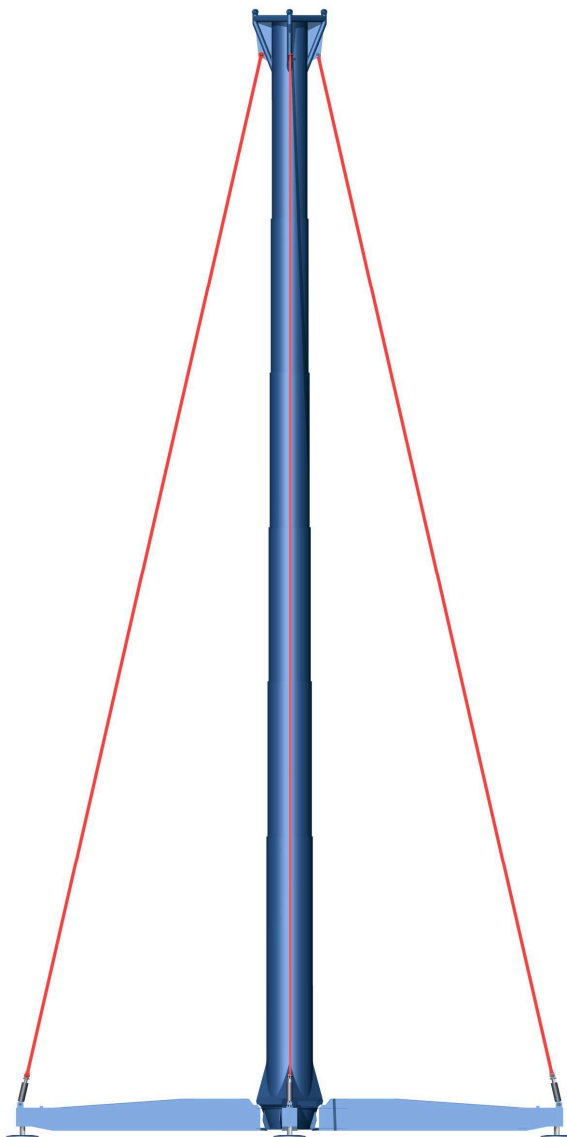
Úprava nabízela možnost výrazně kratšího montážního času, neboť montáž kratších výztuží neovlivňuje vysunování a zasunování věže, a samotná montáž výztuží probíhá během dalších prací na sestavování jeřábu. Časová úspora by se tedy blížila metodě odstranění výztuží (kapitola 7.2). Oproti této úpravě ale přináší posílenou oblast základny a první sekce věže, kde je největší napětí od zatížení a největší deformace ovlivňující pracovní schopnosti jeřábu. Výsledné posunutí horní části věže při maximální zátěži je 1106mm, což je výrazně lepší než celkové posunutí u předchozí úpravy. Navíc bylo počítáno s věží menšího průměru (2,5m oproti 3m).

Ačkoli je posunutí věže vlivem pružných deformací znatelně lepší, pořád je to příliš mnoho pro přesnou práci jeřábu. Použití hydraulických zámků výztuží by navíc přineslo další posunutí věže. Bylo by sice možné použít věž průměru 3m, což by mohlo citelně zlepšit výsledek, přineslo by to ale stejné komplikace, jako u předchozího řešení, tedy vyšší hmotnost, možnou potřebu rozdělit věž na dvě části a předělání systému zdvihání věže do svislé polohy.

Dalším problémem je cena tohoto řešení. Takto masivní hydraulické výztuže by byly jistě i velmi drahé, navíc by se musela zvětšit zásoba hydraulického oleje a zvýšit výkon čerpadla (aby vysunutí výztuží nebylo příliš zdlouhavé). Vzhledem k ceně tohoto řešení a neuspokojivé tuhosti jeřábu hodnotím tuto úpravu jako **špatně využitelnou**. Z tohoto důvodu nejsou rozpracovány pevnostní analýzy dalších částí jeřábu.

9 NAVRHOVANÁ ÚPRAVA - UPNUTÍ VÝZTUŽÍ PŘÍMO DO VĚŽE

Z předchozích dvou kapitol (7 a 8) vyplývá, že výztuže nelze odstranit a jejich zkrácení se také příliš neosvědčilo. Je tedy zřejmé, že výztuže musí v konstrukci jeřábu zůstat. Je zde ovšem možnost zjednodušit montáž výztuží plné délky. Toto zjednodušení spočívá v odstranění pomocných ramen a tedy v upínání výztuží přímo do horní části věže (konkrétně do horní části šesté sekce věže) viz obr. 9.1. Montážní čas se tak zkrátí o čas potřebný pro montáž pomocných ramen, výztuže jsou potom místo k ramenům upevněny přímo ke věži. Koncept jeřábu tedy zůstává velmi podobný původnímu konceptu, pouze napínací hydraulické válce pro předepnutí výztuží se přemístí z pomocných ramen buď na věž, nebo do podpěr.



Obr. 9.1 – Zjednodušená vizualizace jeřábu s výztužemi upevněnými přímo do horní části věže.

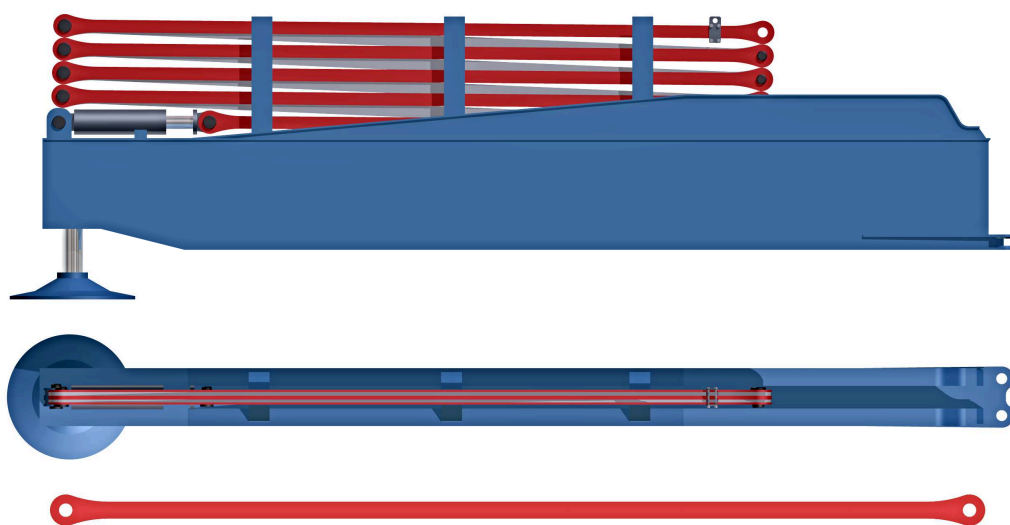
9.1 Koncepční návrh úpravy

Jak již bylo řečeno, celkový koncept jeřábu zůstává velmi podobný původnímu řešení, konstrukce samotných výztuží, jejich uložení v podpěrách a horní část věže se ale od původního řešení odlišují.

Konstrukce a přeprava výztuží:

Výztuže jsou sestaveny z několika částí, každá část je vyrobena z materiálu 11 523 (tvar částí je znázorněn na obr. 9.2). Části výztuží jsou navzájem spojeny čepy.

Výztuže jsou převáženy v podpěrách. Výztuže jsou spojeny s napínacím hydraulickým válcem, který je spojen s podpěrrou. Celá tato sestava (obr. 9.2) je tedy ihned připravena k montáži k jeřábu. Proti bočnímu pohybu jsou výztuže zajištěny bočním vedením, toto vedení zajišťuje i jejich přesné dosednutí do podpěry při procesu spouštění věže. Výztuže v podpěrách musí být kratší než samotná podpěra, aby při jejich rozkládání nedocházelo ke kolizi s dalšími částmi jeřábu.



Obr. 9.2 – Uložení výztuží v podpěře a bližší pohled na část výztuže.

Montáž výztuží:

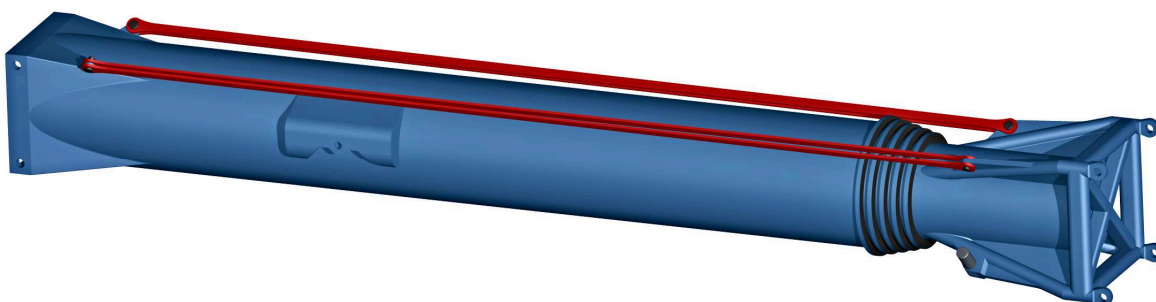
1. Podpěry s výztužemi se přimontují k základně věže.
2. Volná (horní) část výztuže se za pomoci jeřábu zvedne k horní části věže a tam se upne do montážního otvoru.
3. Vysune se věž jeřábu. Jednotlivé části výztuží jsou spojeny a poskládány v podpěře, při procesu výsunu věže se rozkládají ale pořád jsou spojeny, věž se tedy může bez prodlevy vysunout až do maximální výšky.

4. Po vysunutí věže dojde k napnutí výztuží pomocí napínacích hydraulických válců. Toto předeprnutí vymezí vůle ve výztužích a celém jeřábu.

Díky odstranění mezikroku montáže pomocných ramen se zjednodušila a zrychlila montáž výztuží. Pořád je ale potřeba používat pro montáž výztuží jeřáb. I tato potřeba by se dala částečně odstranit.

9.2 Vylepšená montáž výztuží

Největší časovou ztrátou při montáži výztuží je nutnost použití jeřábu pro uchycení výztuží ke věži. Částečným řešením je trvalé spojení dvou částí výztuží s věží. Na obr. 9.3 je znázorněna sestava věže a trvale přichycených částí výztuží. Části výztuží jsou přepravovány spolu s věží. Části výztuží jsou uchyceny ke věži na dvou místech, trvale na horní části věže (uchyceny k šesté sekci věže) a dočasně u paty věže (první sekce věže). V základní poloze jsou tedy výztuže pevně spojeny s věží, což umožňuje bezproblémové zdvihání věže do svislé polohy (a rovněž spouštění do vodorovné polohy) bez nutnosti dodatečné starosti o výztuže.

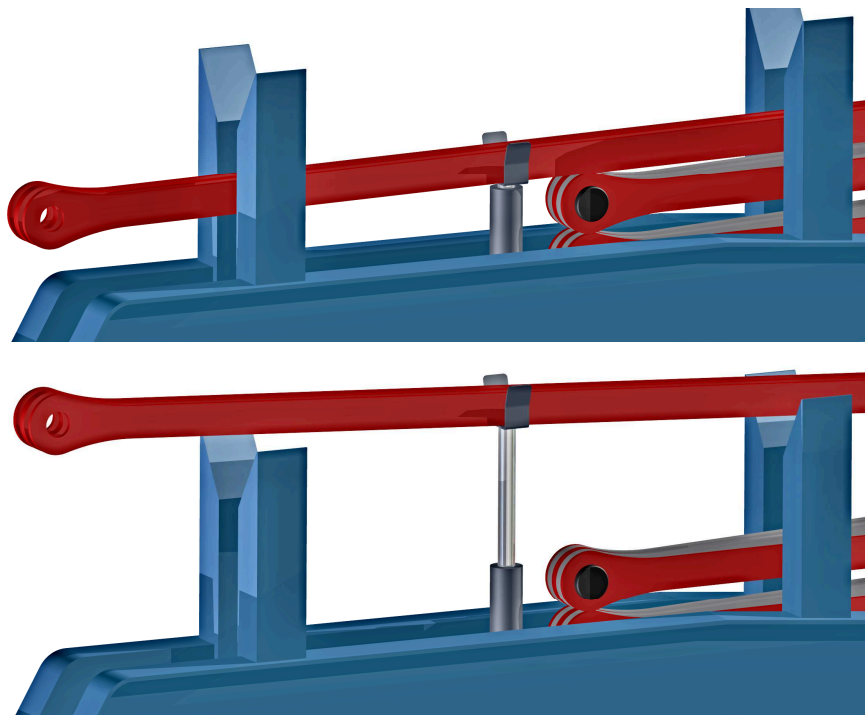


Obr. 9.3 – Upevnění částí výztuží přímo ke věži bez nutnosti použití jeřábu.

Zbylé dvě výztuže je potřeba montovat klasicky jeřábem, neboť kvůli hydraulickým válcům, které zdvihají věž do svislé polohy, není možné výztuže trvale přimontovat k věži. Částečnou výhodou je fakt, že pro montáž dvou výztuží nemusí jeřáb měnit svou polohu, montáž je tedy značně rychlejší než kdyby byly jeřábem montovány všechny výztuže (jeřáb by musel přejet na opačnou stranu).

Protože jsou nyní výztuže rozděleny na dvě dvojice a jedna dvojice má část výztuží trvale spojenou s věží, je zbylá délka výztuží v podpěře kratší, než u druhé dvojice, kde je v podpěře uložena plná délka výztuží. To si vyžádalo dvě řešení uložení výztuží v podpěrách. Dvojice s plnou délkou výztuží v podpěře zůstává ve stavu jako na obr. 9.2.

Podpěry druhé dvojice jsou doplněny o pomocné hydraulické válce, které slouží k přizvednutí horní volné části výztuže (obr. 9.4). Ta musí být přizvednuta, aby bylo možné spojit tuto část výztuže s věžovou částí výztuže. Teoreticky by horní část výztuže mohla být neustále v přizvednuté pozici, poté by hydraulický válec nahradila pevná podpěra, tato část výztuže by ale příliš zasahovala do volného prostoru, což není moc vhodné pro bezpečnost přepravy. Hydraulický píst by také mohl být nahrazen mechanickým zvedákem ovládaným obsluhou, případně pevnou sklopnou podpěrrou, která by se vztyčila po nadzvednutí výztuže. V tomto případě by výztuž nadzvedával buď jeřáb, nebo obsluha za pomoci nějakého zvedáku. Rozhodujícím faktorem by byla cena výsledného řešení, kdy by buď byla dražší konstrukce, nebo vyšší požadavky na obsluhu (dražší provoz).

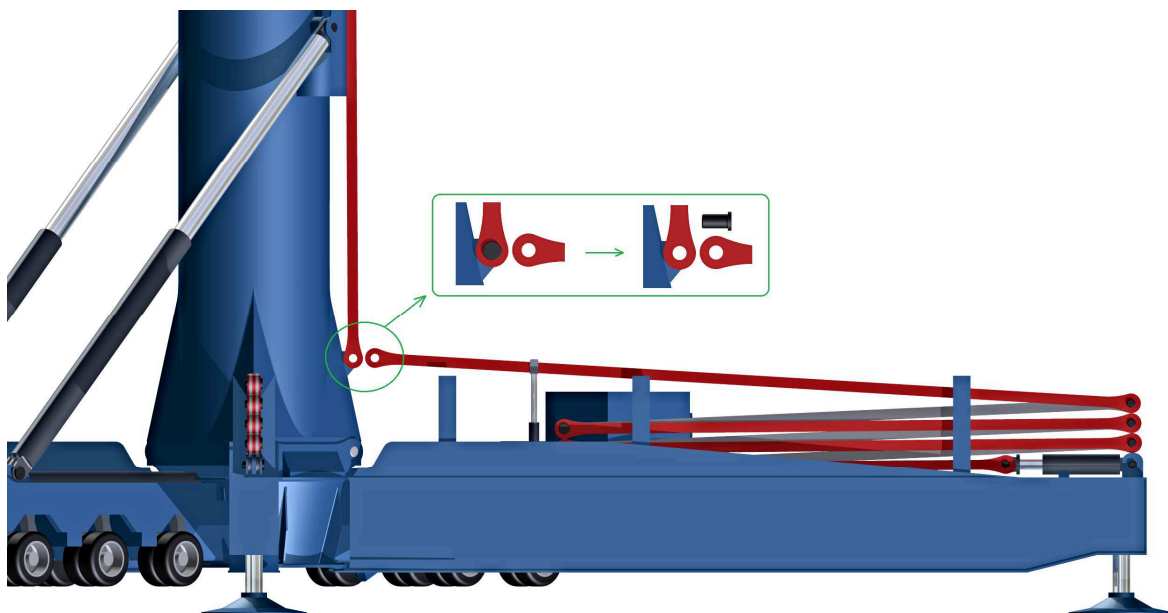


Obr. 9.4 – Pomocný hydraulický válec určený k přizvednutí horní části výztuže do montážní polohy.

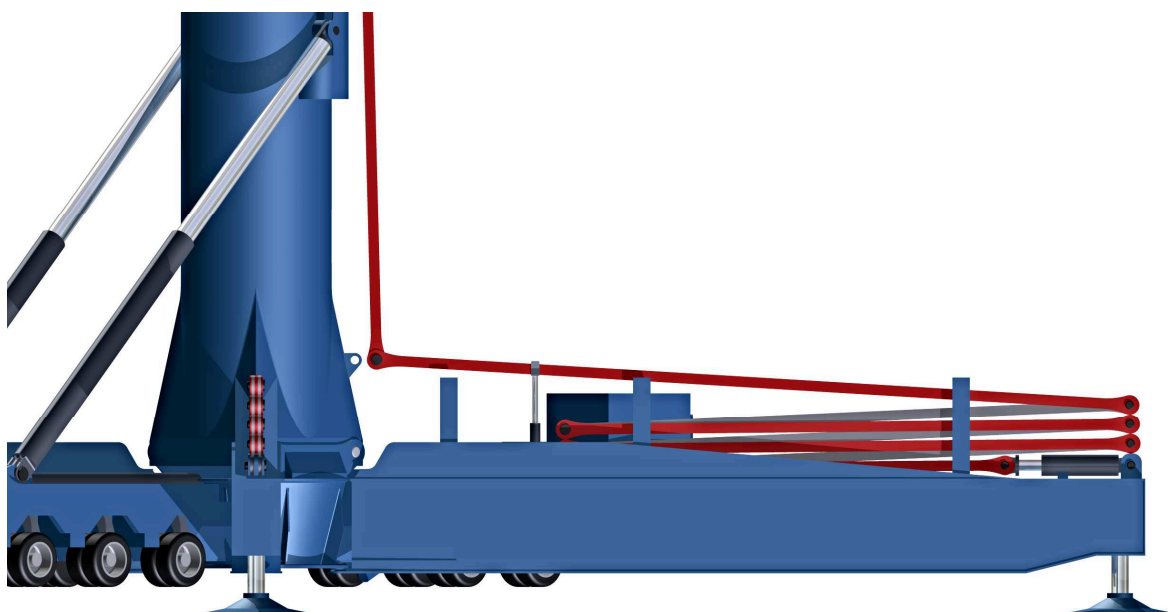
Postup vylepšeného způsobu montáže výztuží:

1. K základně jeřábu se přimontují podpěry.
2. Ke věži se přimontuje výložník a celá věž se zdvihne do svislé polohy. Během procesu zdvihání věže dojde k nadzvednutí horních částí výztuží v podpěrách (obr. 9.4).
3. Po zdvižení věže do svislé polohy se vysune čep upevňující věžovou výztuž ke spodní části věže (obr. 9.5). Věžová výztuž se odtáhne od věže a zasune se do první části výztuže v podpěře (obr. 9.6). Spoj se zajistí čepem, kterým byla věžová výztuž zajištěna ke věži.

4. Mezitím pomocný jeřáb na druhé straně sestavovaného jeřábu zdvihne zbylé dvě výztuže k horní části věže, kde se výztuže zasunou do úchytů ve věži a zajistí se čepem, který je automaticky vysunován hydraulickým válcem (obr. 9.7).
5. Věž se vysune do maximální výšky, napínací hydraulické válce předeprnou výztuže a jeřáb je připraven k práci.



Obr. 9.5 – Věžová výztuž se odjistí vysunutím čepu, tímto čepem se poté spojí věžová výztuž s výztužemi v podpěře.



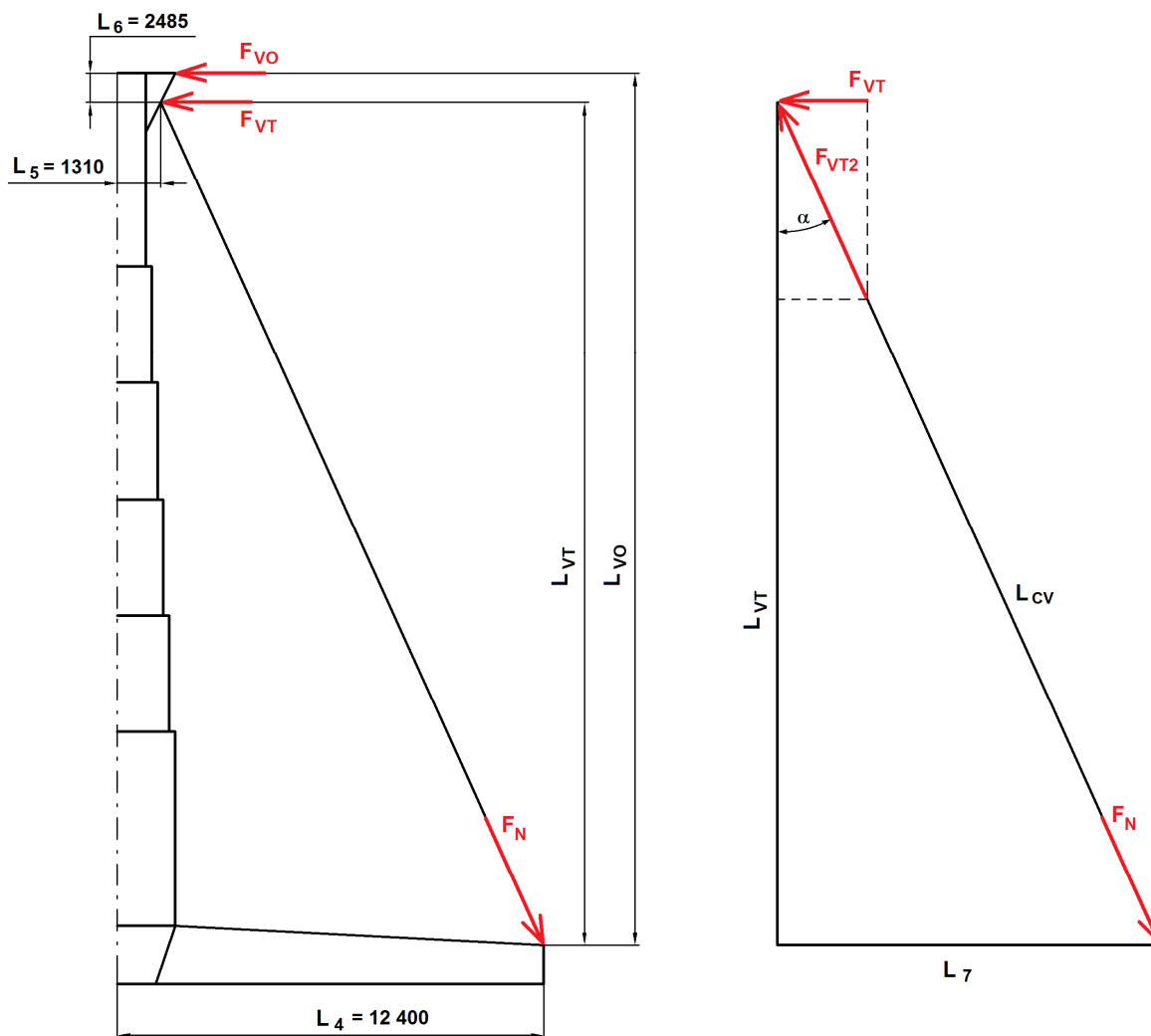
Obr. 9.6 – Věžová výztuž se odsune od věže a spojí se s výztužemi v podpěře.



Obr. 9.7 – Po montáži podpěr pomocí druhého jeřábu je celý komplet připraven na vysunutí věže.

9.3 Namáhání věže a výztuží

Silové schéma zátěže věže s výztužemi je na obr. 9.8. Věž je namáhána silou F_{VO} , tato síla se do výztuží přenese ve formě sil F_{VT} a F_{VT2} . Výztuže jsou namáhány na tah od síly F_{VT2} a napínací síly F_N . Věž je od síly F_{VO} namáhána na ohyb, vyhnutí věže je ale pouze tak velké, o kolik to dovolí pružná deformace výztuží. Z minulých kapitol je zřejmé, že věž se ohýbá od síly F_{VO} poměrně značně, neklade tedy síle F_{VO} příliš odporu ve směru ohybu, dá se tedy uvažovat, že se veškerý účinek od síly F_{VO} přenese do výztuží, které zabraňují věži v ohybu. Samotná věž je pak zatěžována pouze na tlak a vzpěr od hmotnosti zvedaného břemene a komponent jeřábu. Tyto síly nejsou znázorněny v obr. 9.8.



Obr. 9.8 – Silové poměry u věže s výztužemi.

9.4 Deformační kontrola

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (9.3), deformace a tedy posunutí horní části věže závisí na deformaci táhel.

Předpoklad: Veškerý ohybový účinek na věž od síly F_{VO} se přenesou do výztuží. Dalším předpokladem je výpočet deformace pro nejnevýhodnější pozici jeřábu a výztuží. Nejnevýhodnější pozice nastane když celou zátěž od síly F_{VO} nese pouze jediná výztuž. S touto pozicí počítá schéma na obr. 9.7.

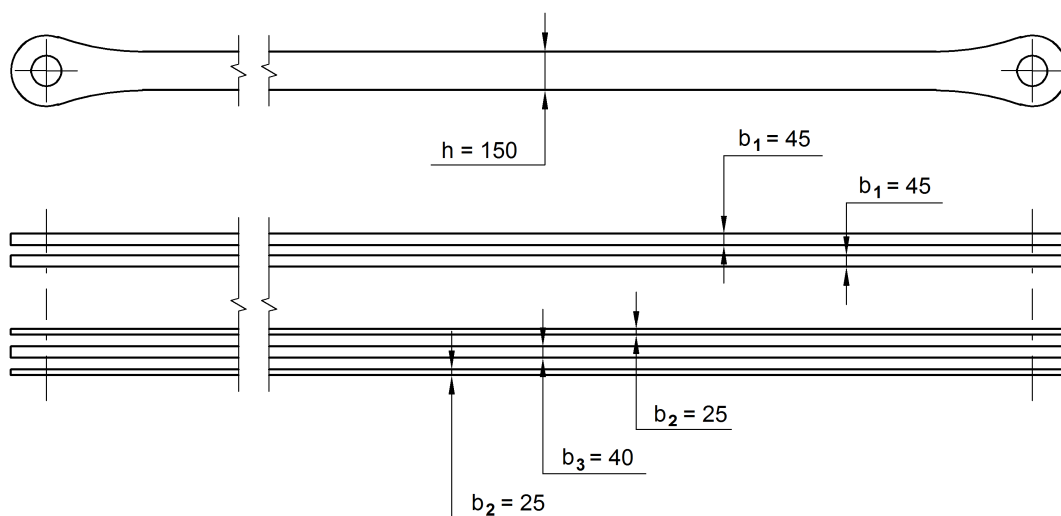
Přepočítaná síla působící na výztuž:

$$F_{VO} \cdot L_{VO} = F_{VT} \cdot L_{VT} \Rightarrow F_{VT} = \frac{F_{VO} \cdot L_{VO}}{L_{VT}} = \frac{F_{VO} \cdot L_{VO}}{L_{VO} - L_6} = \frac{217400 \cdot 76500}{76500 - 2485} = 224699 \text{ N} \quad (9.1)$$

Tahová síla ve výztuži od síly F_{VT} :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{L_7}{L_{VT}} = \frac{L_4 - L_5}{L_{VO} - L_6} \Rightarrow \alpha = \arctg \frac{L_4 - L_5}{L_{VO} - L_6} \\ \sin \alpha &= \frac{F_{VT}}{F_{VT2}} \Rightarrow F_{VT2} = \frac{F_{VT}}{\sin \alpha} = \frac{F_{VT}}{\sin \left(\arctg \frac{L_4 - L_5}{L_{VO} - L_6} \right)} = \frac{224699}{\sin \left(\arctg \frac{12400 - 1310}{76500 - 2485} \right)} = 1516388 N \end{aligned} \quad (9.2)$$

Pro výpočet pružné deformace výztuží je potřeba znát rozměry výztuží. Navržené rozměry výztuží jsou na obr. 9.9, jsou zobrazeny rozměry všech dílčích částí, z kterých se poté sestavují dvou a tří dílné sekce.



Obr. 9.9 – Rozměry výztuží pro určení nosného průřezu.

Výpočet nosného průřezu výztuží:

$$S_v = b \cdot h = 2 \cdot b_1 \cdot h = (2 \cdot b_2 + b_3) \cdot h = 2 \cdot 45 \cdot 150 = (2 \cdot 25 + 40) \cdot 150 = 13500 \text{ mm}^2 \quad (9.3)$$

Výpočet celkové délky výztuží:

$$\begin{aligned} L_{CV} &= \sqrt{L_7^2 + L_{VT}^2} = \sqrt{(L_4 - L_5)^2 + (L_{VO} - L_6)^2} = \sqrt{(12400 - 1310)^2 + (76500 - 2485)^2} \\ L_{CV} &= 74841,22 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9.4)$$

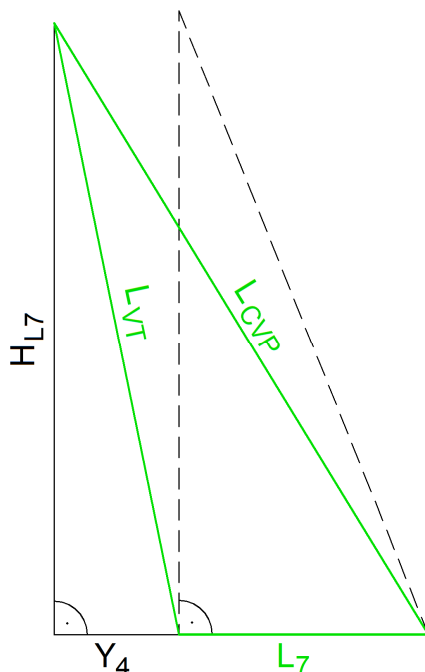
Prodloužení výztuže vlivem pružné deformace:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta L}{L_{CV}} \\ \Delta L &= \frac{\sigma \cdot L}{E} = \frac{\frac{F_{VT2}}{S_v} \cdot L_{CV}}{E} = \frac{F_{VT2} \cdot L_{CV}}{S_v \cdot E} = \frac{1516388 \cdot 74841,22}{13500 \cdot 210000} = 40,03 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9.5)$$

Délka výztuže po prodloužení pružnou deformací:

$$L_{CVP} = L_{CV} + \Delta L = 74841,22 + 40,03 = 74881,25 \text{ mm} \quad (9.6)$$

Pro určení posunutí horní části věže vlivem deformace výztuží je potřeba určit závislost posunutí věže na délce deformace výztuží. Schéma této závislosti je na obr. 9.10. Zatímco před deformací výztuží tvoří výztuž, věž a podpěra pravoúhlý trojúhelník, po deformaci výztuží se z tohoto trojúhelníku stává obecný trojúhelník. Pro určení vzdálenosti Y_4 je tedy potřeba zavést výšku ke spodní straně trojúhelníku a početně určit tuto výšku.



Obr. 9.10 – Schéma závislosti prodloužení výztuží a vyhnutí věže. Čárkovaný trojúhelník je sestava před deformací, zelený trojúhelník pak sestava po deformaci výztuží.

Výpočet polovičního obvodu trojúhelníku:

$$\begin{aligned} L_p &= \frac{L_7 + L_{CVP} + L_{VT}}{2} = \frac{L_4 - L_5 + L_{CVP} + L_{VO} - L_6}{2} = \\ &= \frac{12400 - 1310 + 74881,25 + 76500 - 2485}{2} = 79993,125 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9.6)$$

Výška trojúhelníku [13]:

$$\begin{aligned} H_{L7} &= \frac{2}{L_7} \cdot \sqrt{L_p \cdot (L_p - L_7) \cdot (L_p - L_{CVP}) \cdot (L_p - L_{VT})} \\ H_{L7} &= \frac{2}{12400 - 1310} \cdot \sqrt{79993,125 \cdot (79993,125 - 11090) \cdot (79993,125 - 75119,422) \cdot (79993,125 - 74255)} \\ H_{L7} &= 74014,507 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9.7)$$

Posunutí věže vlivem deformace výztuže:

$$Y_3 = \sqrt{L_{VT}^2 - H_{L7}^2} = \sqrt{74015^2 - 74014,507^2} = 270,1mm \quad (9.8)$$

9.5 Kontrola stability upraveného jeřábu

Vlivem změny konstrukce a odstranění některých částí jeřábu se změnila hmotnost jeřábu a tedy i stabilita jeřábu. Je proto potřeba zkontrolovat stabilitu jeřábu pro nové hmotnosti jednotlivých částí a celkovou hmotnost jeřábu.

Detailní rozbor sil působících na jeřáb a na jeho destabilizaci je popsán v kapitole 6. V této kapitole je popsán i postup určení stability podle normy ČSN EN 4304.

Předpoklad : v kapitole 5.3.1 je výpočet působení větru na věž jeřábu, v kapitole 6.1.3 potom výpočet destabilizačního momentu od této síly. Při těchto výpočtech byl brán průměr věže 2,5 metru. Průměr věže je nyní ale pouze 2,15 metru, průměr věže je tedy menší a tím pádem i síla od působení větru by byla nižší. Je ovšem potřeba započítat navíc plochu výztuží, s touto plochou nebylo v kapitolách 5 a 6 počítáno. Výztuže mají šířku 150mm a v nejnevýhodnější pozici jeřábu působí vítr na dvě výztuže, návětrná plocha jeřábu se tedy zvýší o šířku 300mm. Pokud tuto šířku připočítáme k průměru věže, dostaneme 2,45m. Proto budu uvažovat s působením větru pro věž o průměru 2,5m, neboť jsou hodnoty větru velmi podobné.

Hmotnosti jednotlivých částí jeřábu se stabilizačním účinkem po změně konstrukce:

- Věž: $m_V = 88\,500\text{kg}$
- Podvalník: $m_P = 37\,500\text{ kg}$
- Strojovna výložníku: $m_S = 13\,300\text{ kg}$
- Podpěry celkem: $m_{PP} = 37\,200\text{ kg}$
- Výztuže celkem: $m_{VZ} = 33\,900\text{ kg}$

Kontrola základní stability jeřábu:

$$\sum M_S \geq k_S \cdot \sum M_D$$

$$L_S \cdot g \cdot (m_V + m_P + m_{PP} + m_{VZ}) + (L_S + L_{TS}) \cdot g \cdot m_S \geq k_{S1} \cdot M_{KZS} \quad (9.9)$$

$$k_{S1} = \frac{L_S \cdot g \cdot (m_V + m_P + m_{PP} + m_{VZ}) + (L_S + L_{TS}) \cdot g \cdot m_S}{M_{KZS}}$$

$$k_{s1} = \frac{8,75 \cdot 9,81 \cdot (88500 + 37500 + 37200 + 33900) + (8,75 + 1,4) \cdot 9,81 \cdot 13300}{13202200} = 1,38$$

$$k_{s1} \geq 1$$

Základní stabilita jeřábu VYHOVUJE

Kontrola dynamické stability jeřábu:

$$\sum M_S \geq k_S \cdot \sum M_D$$

$$L_S \cdot g \cdot (m_V + m_P + m_{PP} + m_{VZ}) + (L_S + L_{TS}) \cdot g \cdot m_S \geq k_{s2} \cdot M_{KDS}$$

$$k_{s2} = \frac{L_S \cdot g \cdot (m_V + m_P + m_{PP} + m_{VZ}) + (L_S + L_{TS}) \cdot g \cdot m_S}{M_{KDS}} \quad (9.10)$$

$$k_{s2} = \frac{8,75 \cdot 9,81 \cdot (88500 + 37500 + 37200 + 33900) + (8,75 + 1,4) \cdot 9,81 \cdot 13300}{14113500} = 1,29$$

$$k_{s2} \geq 1$$

Dynamická stabilita jeřábu VYHOVUJE

9.6 Shrnutí úpravy

Úprava počítá s odstraněním pomocných ramen a s upínáním výztuží přímo do věže. Tato konstrukce je ověřena praxí u různých věží, stožárů a podobně, na jeřábu ovšem ještě nebyla použita. Ukázalo se, že i u jeřábů má tato konstrukce smysl.

Zátěž jeřábu je výhodnější než u předchozích řešení (kapitola 7 a 8) neboť věž je namáhána na ohyb minimálně a hlavní zátěž je u věže ve formě vzpěru. Většina síly vyvozující u věže ohyb se přenesla do výztuží, kde se projevuje formou tahu. Vychýlení věže je tedy pouze vlivem deformace výztuží a má maximální hodnotu 270mm, což je značné zlepšení oproti předchozím úpravám a pro praxi přijatelná hodnota. Tuhost celé konstrukce by se dala ještě zlepšit zvětšením nosného průřezu výztuží, narostla by ovšem i hmotnost výztuží. Kromě výztuží je zbytek jeřábu namáhán stejně, jako u původního řešení, proto jsem se více nezabýval pevností ostatních částí jeřábu.

Tato úprava nevyžaduje zásadní změny v konstrukci hlavních dílů jeřábu, je potřeba upravit horní část věže pro přímé uchycení výztuží, vybavit spodní část věže dvěma oky pro uchycení výztuží a upravit konstrukci podpěr pro uložení výztuží (ty mají proti původním o něco vyšší rozměry, navíc přibyl jeden hydraulický válec a napínací hydraulický válec se přesunul do výztuže). Poslední úpravou je optimalizace tvaru

přivařené části na věži pro upnutí zdvihacích hydraulických válců, aby nekolidovala s věžovými částmi výztuží. Případně by se tato kolize dala vyřešit přidáním kloubu na věžovou část výztuží, aby lépe kopírovaly tvar okolo přivařených částí.

Úprava ale nemá jen samá pozitiva. Mezi nevýhody patří přidaná hmotnost ke věži a jejímu podvalníku, neboť věžové části výztuží se přemisťují spolu s věží a váží 3,5 tuny.

Hlavní předností této úpravy je zjednodušení montáže jeřábu. Odstraněním ramen došlo ke snížení počtu operací nutných k montáži jeřábu a tím ke zkrácení času, neboť původně byla potřeba nejprve upevnit ramena k výztužím v podpěrách, a poté samotné ramena upevnit ke věži. Další optimalizací montáže samotných výztuží došlo rovněž ke zkrácení montážního času. Montážní čas jeřábu se po úpravě přiblížil času, který by byl potřeba u jeřábu, který by žádné výztuže neměl. Jedinou operací navíc oproti verzi, kdy jsou výztuže odstraněny, je zdvižení dvou výztuží jeřábem a napasování do montážních otvorů. Zbylé dvě výztuže se montují zároveň s těmi prvními dvěma a jejich montáž je rychlejší. Čas potřebný pro montáž výztuží tipuji na 20 minut.

Výslednou redukci času zjistíme, pokud z procesu montáže odebereme časy týkající se montáže ramen a výztuží. Časy jsou uvedeny v tabulce 1 v kapitole 4.2. Při montáži jeřábu tedy budou vynechány operace montáže ramen a výztuží (48 + 40 minut) a příprava pro tuto montáž (36 minut). **Celková úspora času při montáži je 104 minut** pokud odečteme čas potřebný k montáži nových výztuží. Při demontáži budou vynechány operace demontáže ramen a výztuží (21 + 31 minut) a operace odchodu personálu z věže, neboť již nebude potřeba personálu na věži (20 minut). **Celková úspora času při demontáži je 52 minut** pokud odečteme čas potřebný k montáži nových výztuží.

Průměrně tedy úprava ušetří při montáži a demontáži **78 minut** což představuje **průměrnou úsporu času** ve výši **16 %**. Úspora času je tedy poměrně značná, proto spolu s přijatelným nárokem na úpravu konstrukce jeřábu hodnotím tuto úpravu jako **dobře použitelnou**.

10 MĚRNÝ TLAK JEŘÁBU NA PODLOŽÍ

Vysoká hmotnost jeřábu s břemenem působí vysokým tlakem na podloží. Aby nedošlo k nadměrnému tlaku na podloží, je potřeba použít zajistit dostatečnou styčnou plochu talířů podpěr, případně pro měkčí podloží použít pod talíře přídavné desky, které zvětší styčnou plochu s podložím a tím lépe rozloží síly působící od jeřábu a sníží měrný tlak.

Pro určení potřebné plochy talířů či desek je potřeba určit síly od jeřábu působící na podloží. Jeřáb má čtyři podpěry, každou s jedním styčným talířem, zátěž od jeřábu se tedy přenáší na podloží přes čtyři plochy. Pokud má jeřáb nevysunutý výložník a nezvedá břemena, působí na všechny podpěry přibližně stejná zátěž. Pokud ovšem dojde ke klopení jeřábu vlivem větru, tíhou břemena a tíhou vysunutého výložníku, dojde i k nerovnoměrnému rozložení tlaku na podloží. Nejvíce budou na podloží působit podpěry, v nichž se nachází body klopení.

Nejnevýhodnější poloha jeřábu pro měrný tlak na podloží nastane, pokud je jeřáb klopen pouze přes jednu podpěru. Pokud by byl klopen přes dvě podpěry, tedy v poloze jako na obr. 6.1 v kapitole 6, působil by maximální měrný tlak na dvě podpěry, výsledný měrný tlak na jednu podpěru by byl tedy poloviční. Pokud bude jeřáb klopen přes jednu podpěru, ponese tato jedna podpěra maximální zátěž sama a bude tedy vyvozovat vyšší tlak na podloží. Přestože je efektivní délka podpěr v této poloze vyšší, než v poloze na obr. 6.1 v kapitole 6, a bude tedy docházet k menšímu klopení jeřábu od působení větru, břemene a dalších sil a efekt posunutí zátěže na přední podpěru tedy nebude tak velký, pořád bude přenášet tuto zátěž pouze jedna podpěra a ve výsledku bude měrný tlak pod touto podpěrrou nejvyšší možný.

Po určení nejnevýhodnější polohy jeřábu vůči podpěrám je potřeba určit nejnevýhodnější polohu břemene, tedy v které pozici z tabulky 2: nosnost jeřábu (kapitola 5.1) bude vznikat maximální měrný tlak. V úvahu připadají dvě kritické polohy:

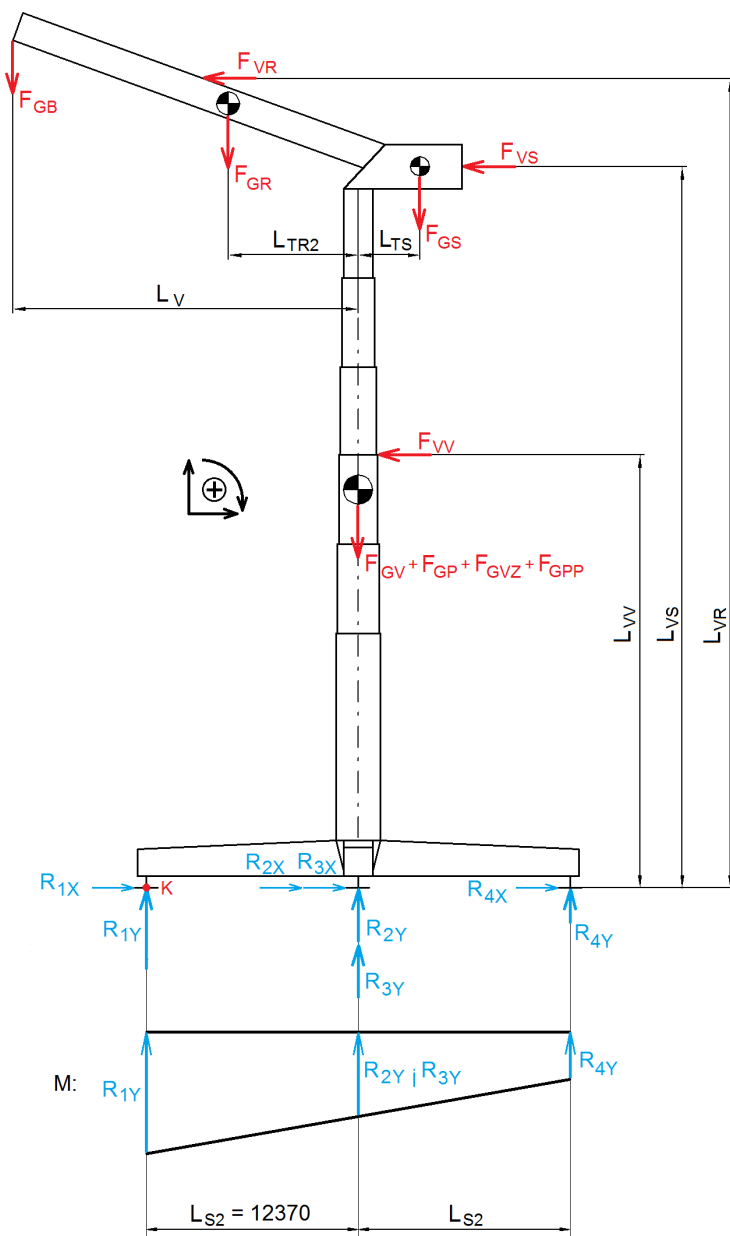
1. **Maximálně destabilizační poloha** – v této poloze je jeřáb nejvíce klopen přes přední podpěru, bude tedy maximální efekt posunutí zátěže na přední podpěru.
2. **Maximální hmotnost břemene** – v této poloze je jeřáb klopen na přední podpěru méně, ale vysoká hmotnost břemene způsobí zvýšení měrného tlaku pod všemi podpěrami.

10.1 Výpočet reakcí v podpěrách

Na obr. 10.1 je znázorněn rozbor všech sil na jeřábu působících na podpěry a reakce v podpěrách. Zobrazen je i bok klopení K pod kterým je maximální reakce a momentová charakteristika která lineárně ovlivňuje velikost reakcí se vzdáleností od bodu klopení.

Síly R_{1X} až R_{4X} jsou reakcemi pouze od působení větru ve vodorovné rovině.

Předpoklad: Reakce R_{2Y} a R_{3Y} leží přesně mezi reakcemi R_{1Y} a R_{4Y} , z momentové charakteristiky se tedy dá odvodit, že velikosti sil R_{2Y} a R_{3Y} bude rovněž přesně mezi silami R_{1Y} a R_{4Y} . Reakce R_{2Y} a R_{3Y} mají shodnou velikost.



Obr. 10.1 – Schéma sil na jeřábu a reakcí v podpěrách.

Velikost reakcí byla vypočítána pro obě kritické polohy, tedy pro maximálně destabilizační polohu a pro polohu s maximální hmotností břemene. Vyšší reakce pod všemi podpěrami vycházely při pozici s maximální hmotností břemene, uvedu tedy výpočet pouze pro tuto polohu.

Výpočet reakcí pro hmotnost břemene $m_{GB} = 139$ tun a vzdálenost vyložení $L_V = 7$ m. Při této poloze ramena výložníku je vzdálenost $L_{TR2} = 2,07$ m (příloha B1).

Vztah mezi reakcemi R_{1Y} až R_{4Y} :

$$R_{2Y} = R_{3Y} = \frac{R_{1Y} + R_{4Y}}{2} \quad (10.1)$$

Vztah pro rovnováhu sil a reakcí ve vodorovném směru a výpočet reakce R_{1X} :

$$\begin{aligned} \sum F_{iX} &= 0 \Rightarrow R_{1X} + R_{2X} + R_{3X} + R_{4X} - F_{VV} - F_{VS} - F_{VR} = 0 \\ R_{1X} &= R_{2X} = R_{3X} = R_{4X} \\ 4 \cdot R_{1X} &= F_{VV} + F_{VS} + F_{VR} \\ R_{1X} &= \frac{F_{VV} + F_{VS} + F_{VR}}{4} = \frac{30882,1 + 1625,4 + 388,5}{4} = 8224N \end{aligned} \quad (10.2)$$

Velikosti reakcí ve vodorovném směru jsou o několik řádů nižší, než velikosti reakcí ve svislém směru, zvýšení výsledného tlaku na podloží od těchto sil by bylo minimální, pro další výpočty proto tyto reakce zanedbám.

Pomocný výpočet – součet všech sil působících na jeřáb ve svislém směru:

$$\begin{aligned} F_P &= F_{GR} + F_{GB} + F_{GS} + F_{GV} + F_{GP} + F_{GVZ} + F_{GPV} \\ F_P &= g \cdot (m_R + m_B + m_S + m_V + m_P + m_{VZ} + m_{PP}) \\ F_P &= 9,81 \cdot (41,9 + 139 + 13,3 + 88,5 + 37,2 + 37,5 + 33,9) = 3838,7kN \end{aligned} \quad (10.3)$$

Vztah pro rovnováhu sil a reakcí ve svislém směru a odvození výpočtu reakce R_{1Y} :

$$\begin{aligned} \sum F_{iY} &= 0 \Rightarrow R_{1Y} + R_{2Y} + R_{3Y} + R_{4Y} - F_P \\ R_{1Y} &= F_P - 2 \cdot R_{2Y} - R_{4Y} \\ R_{1Y} &= F_P - 2 \cdot \frac{R_{1Y} + R_{4Y}}{2} - R_{4Y} \end{aligned} \quad (10.4)$$

$$R_{1Y} = F_P - R_{1Y} - R_{4Y} - R_{4Y}$$

$$R_{1Y} = \frac{F_P - 2 \cdot R_{4Y}}{2}$$

Pomocný výpočet – výsledný moment od sil působících na jeřáb vůči bodu K:

$$M_P = (F_{GV} + F_{GP} + F_{GVZ} + F_{GPV}) \cdot L_{S2} + F_{GS} \cdot (L_{S2} + L_{TS}) - F_{GR} \cdot (L_{TR2} - L_{S2}) - F_{GB} \cdot (L_{S2} - L_V) - M_{KV} - M_{KS} - M_{KRV}$$

$$M_P = g \cdot (m_V + m_P + m_{VZ} + m_{PP}) \cdot L_{S2} + g \cdot m_S \cdot (L_{S2} + L_{TS}) - g \cdot m_R \cdot (L_{TR2} - L_{S2}) - g \cdot m_B \cdot (L_{S2} - L_V) - M_{KV} - M_{KS} - M_{KRV}$$

$$M_P = 9,8 \cdot (88,5 + 37,5 + 37,2 + 33,9) \cdot 12,4 + 9,8 \cdot 133 \cdot (1,4 + 12,4) - 9,8 \cdot 419 \cdot (2,07 - 12,4) - 9,8 \cdot 139 \cdot (12,4 - 7) - 1251 - 123 - 3357$$

$$M_P = 35554 \text{ kNm} \quad (10.5)$$

Výpočet reakce R_{4Y} :

$$\sum M_{iK} = 0$$

$$M_P - R_{4Y} \cdot 2 \cdot L_{S2} - 2 \cdot R_{2Y} \cdot L_{S2} = 0$$

$$M_P - R_{4Y} \cdot 2 \cdot L_{S2} - 2 \cdot \frac{R_{1Y} + R_{4Y}}{2} \cdot L_{S2} = 0$$

$$M_P - R_{4Y} \cdot 2 \cdot L_{S2} - R_{1Y} \cdot L_{2S} - R_{4Y} \cdot L_{S2} = 0$$

$$M_P - 3 \cdot R_{4Y} \cdot L_{S2} - \frac{F_P - 2 \cdot R_{4Y}}{2} \cdot L_{2S} = 0 \quad (10.6)$$

$$6 \cdot R_{4Y} \cdot L_{S2} = 2 \cdot M_P - (F_P - 2 \cdot R_{4Y}) \cdot L_{2S}$$

$$6 \cdot R_{4Y} \cdot L_{S2} - 2 \cdot R_{4Y} \cdot L_{2S} = 2 \cdot M_P - F_P \cdot L_{2S}$$

$$R_{4Y} = \frac{2 \cdot M_P - F_P \cdot L_{2S}}{4 \cdot L_{S2}} = \frac{2 \cdot 35554 - 3838,7 \cdot 12,37}{4 \cdot 12,37} = 477,5 \text{ kN}$$

Výpočet reakce R_{1Y} :

$$R_{1Y} = \frac{F_P - 2 \cdot R_{4Y}}{2} = \frac{3838,7 - 2 \cdot 477,5}{2} = 1441,7 \text{ kN} \quad (10.7)$$

Síla R_{1Y} představuje maximální sílu působící na podloží, z této síly budu vycházet při návrhu styčných ploch jeřábu a podloží.

10.2 Povolený měrný tlak na podloží

Povolené hodnoty pro měrný tlak na podloží od podpěr jeřábu nelze nalézt v žádné literatuře, protože se obecně tyto hodnoty nevyskytují. Výrobci určují tyto měrné tlaky pomocí složitých výpočtů, spíše ale vychází ze zkušeností a testů.

Pro určení přibližných hodnot akceptovatelného měrného tlaku na podloží jsem se rozhodl vyjít z hodnot měrného tlaku u strojů pro povrchovou těžbu. Tyto stroje se totiž pohybují po stejných typech podloží, jako jeřáby pro stavbu větrných elektráren. Navíc i stavy podloží bývají shodné. Tyto velkstroje i přes svou vysokou hmotnost musí mít přiměřený tlak na podloží, obvyklé hodnoty u těchto strojů jsou **0,1 - 0,12 MPa** [8] (pro kolesové rýpadla).

Tyto stroje ovšem nejsou určeny jen pro stacionární práci, ale mají za úkol se po dole i pohybovat. Proto musí být tlaky nižší, aby se pásy těchto strojů nebořily hluboko do země a tím se nezvětšoval jízdní odpor. Zatímco jeřáb je čistě stacionární zařízení a do jisté míry je akceptovatelné zhutňování půdy pod podpěrami jeřábu (a tím propadání podpěr). Pokud by se podpěry propadaly nerovnoměrně, je zde možnost pomocí hydraulických válců podpěr udržovat jeřáb v rovině. Z těchto důvodů je možné povolit u jeřábu vyšší měrné tlaky, než u kolesových rýpadel, přepokládám až na hodnotu **0,25 MPa**.

Dalším měřítkem pro určení vhodného měrného tlaku může být tabulka namáhání zemin pro základy budov [zdroj 14 str. 693]. Nejnevýhodněji zde vychází měrné tlaky pro jílovité půdy. Povolené tlaky se volí podle toho, v jaké konzistenci daná zemina je. Vzhledem k tomu, že již při stavbě jeřábu dochází pod podpěrami ke zhutňování půdy, můžeme předpokládat stav zeminy jako pevný. Poté vychází povolený měrný tlak 0,2 MPa. Budovy ovšem mají poměrně přísné limity sedání půdy pod základy, dá se předpokládat, že u jeřábu tento faktor nebude natolik limitující. Z těchto důvodů usuzuji, že by bylo možné povolit pro jeřáb maximální měrný tlak pod podpěrami **$p_D = 0,25 \text{ MPa}$** pro univerzální použití.

10.3 Rozměr styčných desek

Výpočet potřebné styčné plochy desek pro $p_D = 0,25 \text{ MPa}$ a sílu R_{1Y} (vzorec 10.7):

$$p = \frac{R_{1Y}}{S_D} \leq p_D \quad (10.8)$$

$$S_D = \frac{R_{ly}}{p_D} = \frac{1441700}{0,25} = 5766800 \text{ mm}^2 \quad (10.9)$$

Desky bývají nejčastěji čtvercového průřezu. Výpočet potřebného rozměru styčných desek:

$$S_D = a^2$$
$$a = \sqrt{S_D} = \sqrt{5766800} = 2401,4 \text{ mm} \approx 2,4 \text{ m} \quad (10.10)$$

Výsledný **doporučený rozměr** desek je tedy **2,4 x 2,4 m**. Desky bývají nejčastěji betonové, při tomto rozměru se tedy dá předpokládat, že budou desky umístované pod podpěry pomocí jeřábu.

Protože jsou desky převáženy na podvalnících společně s dalšími částmi jeřábu a tyto podvalníky nabízí šířku nákladu až 3m, a protože jsou desky umístované jeřábem, je možnost použít desky o rozměru až 3 x 3 metry a tím ještě snížit tlak na podloží. Výsledný tlak na podloží při použití těchto desek:

$$p = \frac{R_{ly}}{S_{D2}} = \frac{1441700}{3000 \cdot 3000} = 0,16 \text{ MPa} \quad (10.11)$$

11 ZÁVĚR

V úvodu práce jsem se zabýval problematikou stavby větrných elektráren a z ní vyplývajícími požadavky na jeřáby, které tyto elektrárny staví. Požadavky na jeřáby pro stavbu větrných elektráren jsou poměrně vysoké. Jednotlivé části elektráren sice nejsou extrémně těžké, zato výšky do kterých musí být vyzdvihnuty jsou velmi vysoké. Jeřáby proto musí umožňovat potřebný zdvih a zároveň musí být rychle připraveny k práci, neboť stavba větrných elektráren trvá často i necelý den a čas potřebný pro sestavení jeřábu tak nesmí neúměrně prodlužovat tento stavební čas.

V dnešní době nejvýhodnějším jeřábem pro stavbu větrných elektráren je jeřáb Grove GTK 1100, který oproti konkurenci nabízí mnohem rychlejší čas sestavení. Protože má jeřáb největší potenciál pro požadované účely, rozhodl jsem se v mé práci zaměřit právě na tento jeřáb. I přes svou vysoce pokročilou konstrukci se nabízí změny jeho konstrukce za účelem ještě rychlejšího sestavení. Ve své práci jsem se zaměřil na několik možných úprav jeřábu za účelem zrychlení jeho montáže. Úpravy se týkají věže jeřábu a jejího zpevnění systémem výztuží.

Nejprve bylo potřeba přesně určit zatížení jeřábu, aby bylo možné zkontrolovat pevnost jeřábu po úpravách. Rozborem všech sil působících na jeřáb bylo dosaženo výsledného zatížení, které působí na věž a výztuže jeřábu. Při určování dílčích sil jsem vycházel z parametrů původního jeřábu, aby byly zaručeny stejné schopnosti jeřábu i po úpravách.

První úprava spočívala v odstranění výztuží věže. Ukázalo se však, že výztuže nemohou být odstraněny, protože i po velkém zvětšení průměru věže byla pružná deformace věže, základny a podpěr příliš vysoká a docházelo k velkému vychýlení horní části věže, tedy i k vychýlení uložení břemene. Navíc úměrně se zvětšením průměru věže rostla i její hmotnost, což stěžuje přepravu jeřábu (zvláště v terénu).

Druhá úprava spočívala ve zkrácení výztuží, kdy byla vyztužena pouze spodní část jeřábu, tedy nejvíce namáhaná část. Výztuže jsou ve formě hydraulických válců, které se automaticky vysunují souběžně s vysunováním věže a jsou upevněny k první sekci věže. Tato úprava již vykazovala lepší hodnoty pružných deformací jeřábu, kdy spodní část jeřábu vykazovala dobrou tuhost a ke znatelnější deformaci docházelo pouze u věže. Tato deformace ale pořád byla poměrně vysoká i přes fakt, že upravená věž měla větší průměr, než původní. Vzhledem k předpokládané vysoké ceně tohoto řešení (drahé hydraulické

výztuže) a neuspokojivým výsledkům tuhosti jeřábu coby celku byla tato úprava rovněž zamítnuta.

Poslední úpravou bylo zjednodušení montáže výztuží, kdy jsou odstraněna pomocná ramena výztuží a ty se upevňují přímo k horní části věže. V tomto řešení je věž namáhána na ohyb minimálně, protože většinu síly vyvozující tento ohyb zachytí výztuže. Výsledná tuhost jeřábu je velmi dobrá, navíc je možné tuto tuhost dále vylepšit zesílením výztuží (za cenu vyšší hmotnosti). Případně by bylo možné vychýlení jeřábu korigovat napínacím válcem každé výztuže. Přestože je u tohoto řešení potřeba konstrukčně upravit několik částí jeřábu, jejich základní rozměry zůstává stejný, stejně jako zůstává stejné i namáhání těchto částí (věž je namáhána pouze na vzpěr). Spolu s dalšími optimalizacemi montáže výztuží bylo dosaženo časové úspory během montáže a demontáže 16%.

V poslední kapitole jsem se zabýval problematikou měrného tlaku jeřábu na podloží. Byly vypočítány reakce ve stojkách jeřábu a tedy síly působící na podloží. Provedl jsem určení teoretického maximálního dovoleného měrného tlaku a pro tento tlak jsem navrhl rozměry styčných desek, které se umísťují pod stojky jeřábu. Vzhledem k relativně nízké váze jeřábu (oproti konkurenčním řešením) jsou výsledné rozměry těchto desek příznivé a není problém přepravovat spolu s jeřábem větší desky, které zaručí ještě nižší tlak na podloží.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ABP - Plzeň a.s. [online].
URL: < <http://www.apb-plzen.cz/teleskopicke-jeřaby> > [cit. 15.4.2014]
- [2] BALCAR, Otakar: *Jeřáby*. Praha, 1950. 734s.
- [3] ČSN EN 13000 – *Jeřáby – Mobilní jeřáby*. Vydavatelství úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, 2010. 105s.
- [4] ČSN ISO 4304 – *Jeřáby – Všeobecné požadavky na stabilitu*. Vydavatelství federálního úřadu pro normalizaci a měření. Praha, 1992. 6s.
- [5] ČSVE.cz: *Betonový základ*. [online].
URL: < <http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305> > [cit. 10.4.2014]
- [6] ČSVE.cz: *Ocelový tubusový stožár*. [online].
URL: < <http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229#prettyPhoto> > [cit. 10.4.2014]
- [7] EkoBonus.cz: *Větrné elektrárny, nejčastější typy, experimentální projekty zajímavosti*. [online].
URL: < <http://www.ekobonus.cz/vetrne-elektrarny-nejcastejsi-typy-experimentalni-projekty-a-zajimavosti> > [cit. 2.5.2014]
- [8] Hornictví.info: *Hornická skripta – stroje pro povrchové dobývání uhlí* [online].
URL: < <http://www.hornictvi.info/prirucka/technika/uhli.htm> > [cit. 10.4.2014]
- [9] CHOJNACKI, Krzysztof – CHLOSTA Mirosław: *Zmiany w konstrukcji żurawia typu GTK 1100 ukierunkowane na skrócenie czasu jego montażu*. Transport č. 2, 2003, str. 22-28
- [10] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Nakladatelství Albra. Úvaly, 2005. 908s.
- [11] Liebherr. *Crawler crane LR 1600/2 technical data*. Technický dokument. [online].
URL: < <http://www.bigge.com/crane-charts/crawler-crane-charts/LR1600-Technical-Data.pdf> > [cit. 14.4.2014]

- [12] Manitowoc. *Teleskopický věžový jeřáb Grove GTK 1100*. Technický dokument. [online].
URL: < http://www.pragotechnik.cz/download/katalog_pro/000039/GTK1100-01B-2013-02.pdf > [cit. 14.4.2014]
- [13] Matematické vzorce: *Výpočty online – vzorce pro trojúhelník* [online].
URL: < <http://vzorce-matematika.sweb.cz/vzorce-pro-trojuhelnik-jak-najit-stranu-osu-teznici-vysku-uhel.php> >
- [14] NOVÁK, Otakar – HOŘEJŠÍ, Jiří: *Statické tabulky pro stavební praxi..* SNTL – Nakladatelství technické literatury. Praha, 1978. 756 s.
- [15] Vertikal.net: *Grove GTK goes into action*. [online].
URL: < <http://www.vertikal.net/en/news/story/5116/> > [cit. 16.4.2014]
- [16] Vestas a.s.: *Wind power station V100-1,8MW*. Technický dokument. [online].
URL: < <http://www.vestas.cz/files/V100-18.pdf> > [cit. 10.4.2014]
- [17] Vestas a.s.: *Wind power station V112-3.0MW and V126-3.0MW*. Technický dokument. [online].
URL: < <http://www.vestas.cz/files/V126-30.pdf> > [cit. 10.4.2014]
- [18] Wodagreen.com: *Jak na to – větrné elektrárny* [online].
URL: < <http://www.wodasound.com/jaknato/wind/wdsvitr.htm> > [cit. 10.4.2014]

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 – Klasické větrné kolo, v tomto případě sloužící pro čerpání vody.....	15
Obr. 2.2 – Moderní větrné elektrárny s tří lopatkovým rotorem (vrtulí).	16
Obr. 2.3 – Příklad tří lopatkové vertikální vztlačové větrné elektrárny.....	16
Obr. 2.4 – Savoniova turbína má sice nízkou účinnost, zato může vypadat velice esteticky.	17
Obr. 2.5 – Koncept stéblové větrné elektrárny ve Spojených arabských emirátech.....	18
Obr. 2.6 – Schéma větrné elektrárny.....	19
Obr. 3.1 – Masivní jeřáb s příhradovými rameny a pásovým podvozkem.	23
Obr. 3.2 – Široké možnosti sestavení ramen a výložníků.	24
Obr. 3.3 – Kolový jeřáb s příhradovými rameny od firmy Demag.....	25
Obr. 3.4 – Kolový jeřáb s teleskopickým ramenem od firmy Demag.	27
Obr. 4.1 – Mobilní věžový jeřáb GTK 1100 s plným vysunutím věže.....	29
Obr. 5.1 – Schéma zatížení jeřábu od všech sil.....	33
Obr. 5.2 – Schéma umístění těžiště ramena výložníku.	35
Obr. 5.3 – Schéma pro určení těžiště ramena výložníku a strojovny vůči ose věže.	36
Obr. 5.4 – Schéma zatížení věže větrem. Zobrazeny jsou dílčí síly, délky vysunutí jednotlivých sekcí a tabulka hodnot větru.	37
Obr. 5.5 – Rozměry zadní části strojovny výložníku.....	38
Obr. 5.6 – Schéma zatížení ramena větrem. Zobrazeny jsou dílčí síly, délky vysunutí jednotlivých sekcí a tabulka hodnot větru.	39
Obr. 6.1 – Schéma polohy jeřábu při nevýhodné pozici pro stabilitu a vzdálenost bodu klopení od osy věže.....	42
Obr. 7.1 – Schéma sil působících na věž a nahrazení jednou silou.	49
Obr. 7.2 – Věž je brána jako dlouhý vetknutý prut zatěžovaný na konci silou.	50
Obr. 7.3 – Detail umístění zatěžující síly, pevné vazby v otvorech paty věže a pohled na sít' prvků.....	52

Obr. 7.4 – Výsledky MKP. Zobrazen průběh napětí ve věži, detail paty věže s vyznačením maximálního reálného napětí.	53
Obr. 8.1 – Spodní část jeřábu zesílená čtyřmi výztuhami.	54
Obr. 8.2 – Uložení hydraulické výztuže v podpěře.	55
Obr. 8.3 – Podpěra s výztuží přimontovaná k základně jeřábu.	55
Obr. 8.4 – Zdvihnutí výztuže pomocným válcem do pracovní polohy.	56
Obr. 8.5 – Schéma namáhání a ohybu věže s podpěrami.	58
Obr. 8.6 – Pevné vazby pro MKP výpočet simulující upnutí věže.	59
Obr. 8.7 – Výsledky MKP pro věž s hydraulickými výztužemi.	60
Obr. 8.8 – Sestava pro MKP s dokonale tuhou věží.	61
Obr. 8.9 – Výsledky MKP pro spodní část jeřábu s dokonale tuhou věží.	62
Obr. 9.1 – Vizualizace jeřábu s výztužemi upevněnými přímo do horní části věže.	64
Obr. 9.2 – Uložení výztuží v podpěře a bližší pohled na část výztuže.	65
Obr. 9.3 – Upevnění částí výztuží přímo ke věži bez nutnosti použití jeřábu.	66
Obr. 9.4 – Pomocný hydraulický válec určený k přizvednutí horní části výztuže do montážní polohy.	67
Obr. 9.5 – Pohled na odjištěnou věžovou výztuž a nadzvednutou první výztuž v podpěře...	68
Obr. 9.6 – Věžová výztuž se odsune od věže a spojí s výztužemi v podpěře.	68
Obr. 9.7 – Silové poměry u věže s výztužemi.	70
Obr. 9.8 – Rozměry výztuží pro určení nosného průřezu.	71
Obr. 9.9 – Schéma závislosti prodloužení výztuží a vyhnutí věže.	72
Obr. 10.1 – Schéma sil na jeřábu a reakcí v podpěrách.	77

14 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : montážní operace a čas potřebný pro jejich provedení.....	31
Tabulka 2 : nosnost jeřábu pro různé polohy vyložení (v tunách).....	34

15 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Schéma montáže jeřábu GTK 1100

Příloha B1 – Tabulka těžišť ramena výložníku vůči ose věže (L_{TR2})

Příloha B2 – Tabulka sil od větru působícího na rameno výložníku + ramena těchto sil
(F_{VR} a L_{VR})

Příloha B3 – Tabulka destabilizačních momentů od hmotnosti břemene (M_{KN})

Příloha B4 – Tabulka destabilizačních momentů od hmotnosti ramena výložníku (M_{KR})

Příloha B5 – Tabulka destabilizačních momentů od větru působícího na rameno výložníku
(M_{KRV})

Příloha B6 – Tabulka celkových destabilizačních momentů (M_K)

Příloha B7 – Tabulka destabilizačních momentů základní stability (M_{KZS})

Příloha B8 – Tabulka destabilizačních momentů dynamické stability (M_{KDS})

Příloha B9 – Tabulka ohybových momentů působících na věž (M_A)

Příloha C1 – Výkres sestavy MLC0012-DIP Mobilní jeřáb

Příloha C2 – Výkres sestavy MLC0012-DIP-01 Podpěra s výztužemi

Příloha C3 – Seznam položek MLC0012-DIP-01 Podpěra s výztužemi

Příloha C4 – Výrobní výkres MLC0012-DIP-01-06 Výztuž krátká 25mm

Příloha C5 – Výrobní výkres MLC0012-DIP-01-07 Výztuž krátká 40mm

Příloha C6 – Výrobní výkres MLC0012-DIP-01-10 Výztuž střední 45mm

Příloha C7 – Výrobní výkres MLC0012-DIP-01-13 Spojovací plech 45mm

Příloha C8 – Výrobní výkres MLC0012-DIP-01-14 Spojovací plech 15mm